

Université de Montréal

**L'utilisation du PC-ADP (Pulse-Coherent Acoustic Doppler Profiler)  
dans un écoulement turbulent en rivière peu profonde**

par  
Annie Cassista

Département de géographie  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)  
en géographie

Février, 2007

© Annie Cassista, 2007.



6  
59  
054  
2007  
V.004

## AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

## NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

**L'utilisation du PC-ADP (Pulse-Coherent Acoustic Doppler Profiler)  
dans un écoulement turbulent en rivière peu profonde**

présenté par:

Annie Cassista

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

Laël Parrott,	président-rapporteur
André G. Roy,	directeur de recherche
Pascale Biron,	membre du jury

**Mémoire accepté le: 19 février 2007**

## RÉSUMÉ

Le PC-ADP, une amélioration récente des profileurs acoustiques à effet Doppler pour mesurer la vitesse de l'eau en rivière, permet d'obtenir des profils de vitesses en trois dimensions à une résolution verticale de quelques centimètres. L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer le potentiel du PC-ADP pour mesurer la turbulence en rivière peu profonde. Dans un premier temps, les mesures du PC-ADP sont comparées avec celles obtenues à l'aide d'un ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) dans une rivière à lit sablonneux. Cette comparaison réalisée à partir de mesures à une résolution de 1 Hz nous permet de constater que le PC-ADP mesure adéquatement les vitesses radiales. À cause de l'inhomogénéité qui caractérise souvent l'écoulement en rivière peu profonde, le passage à des coordonnées cartésiennes entraîne une augmentation du bruit, ce qui se traduit par une variance plus élevée pour les vitesses des composantes longitudinale et latérale et plus faible pour les vitesses de la composante verticale. Le PC-ADP surestime l'énergie cinétique turbulente et sous-estime les cisaillements de Reynolds par rapport à l'ADV. Deuxièmement, le PC-ADP a été déployé dans plusieurs environnements fluviaux de trois rivières caractérisées par des différences de vitesse, de profondeur et de substrat. Les profils de vitesses, de cisaillements de Reynolds et d'énergie cinétique turbulente obtenus sont typiques de ce que l'on rencontre dans ces milieux. L'analyse par ondelettes des mesures de PC-ADP dans un écoulement au-dessus de dunes mobiles a permis de capter les structures macroturbulentes de différentes échelles. En conclusion à cette étude, nous proposons l'utilisation d'un algorithme de résolution des ambiguïtés, une durée d'échantillonnage d'au moins 15 minutes et des cellules de 5 à 9 cm pour mesurer adéquatement les vitesses et la turbulence avec le PC-ADP dans des écoulements de 30 à 70  $\text{cms}^{-1}$  et de 40 à 100 cm de profond. Même si le PC-ADP ne permet pas de capter les plus petites échelles de la turbulence, il ouvre la possibilité de faire avancer les connaissances sur la dynamique des structures turbulentes à grande échelle dans les rivières peu profondes.

**Mots clés:** rivières, turbulence, PC-ADP, ADV

## ABSTRACT

Pulse-Coherent Acoustic Doppler Profiler (PC-ADP) is a new technology that has the ability to measure instantaneous velocity profiles in three dimensions with a high vertical resolution. PC-ADPs seem to be suitable for the study of flow turbulence in shallow rivers. The aim of this work is to assess the potential of the PC-ADP to measure flow, both the mean and turbulent characteristics, in shallow river flows. First, PC-ADP data collected in a sand bed river are compared to those obtained with an ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). The comparison, based on velocities sampled at 1 Hz, revealed that the PC-ADP provides good estimates of radial velocities but some noise is added when transforming these velocities into a Cartesian system. This is caused by the inhomogeneity of the flow. The noise produces an increase of the variance of the longitudinal and lateral velocity components but a decrease in the vertical component. PC-ADP data also over-estimate turbulent kinetic energy and underestimate Reynolds shear stress when compared to ADV measurements. In a second set of experiments, the PC-ADP has been deployed in a variety of fluvial environments with a range of flow velocities, depths and bed roughness. Mean velocity, Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy show the typical profiles expected in these environments. Wavelet analysis of PC-ADP data collected in a non stationary flow over moving sand dunes revealed turbulent structures over a large range of scales. This research has led to several recommendations for further use of the PC-ADP in shallow flows. We propose to use the ambiguity resolution algorithm as we modified it, a sampling period of 15 minutes and cell sizes of 5 to 9 *cm* in order to measure flows from 30 to 70  $\text{cms}^{-1}$  and 40 to 100 *cm* in depth. Even if the PC-ADP cannot resolve the smallest scales of turbulent motion it provides a promising method to improve our understanding of large scale turbulent structures in shallow rivers.

**Keywords:** rivers, turbulence, PC-ADP, ADV.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iv</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b>	<b>xvi</b>
<b>NOTATION</b>	<b>xvii</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>xx</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1 CONTEXTE DE LA RECHERCHE</b>	<b>3</b>
1.1 Turbulence	3
1.1.1 Description statistique de la turbulence	4
1.1.2 Corrélations et analyse spectrale	7
1.1.3 Échelles et structures cohérentes	8
1.2 Mesure de la turbulence	10
1.3 Profileurs acoustiques à effet Doppler	12
1.3.1 Principes physiques	13
1.3.2 Applications des ADP en milieu naturel	19
1.3.3 Limites de l'utilisation des ADP	28
1.4 Vélocimètres acoustiques à effet Doppler	37
<b>2 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODES</b>	<b>39</b>
2.1 Problématique et objectifs	39
2.2 Sites d'étude	40
2.3 Appareils utilisés	42
2.3.1 PC-ADP	42
2.3.2 ADV	43
2.4 Protocole expérimental	44
2.4.1 Comparaison ADV et PC-ADP	44
2.4.2 Déploiements du PC-ADP dans les différents environnements fluviaux	46

2.5	Traitement des données . . . . .	51
2.5.1	Intégrité des données . . . . .	51
2.5.2	Résolution des ambiguïtés . . . . .	53
2.5.3	Durée de l'échantillonnage . . . . .	56
2.5.4	Comparaison entre le PC-ADP et l'ADV . . . . .	56
2.5.5	Tests dans les différents milieux fluviaux . . . . .	60
<b>3</b>	<b>RÉSULTATS DE LA COMPARAISON ENTRE LE PC-ADP ET L'ADV . . . . .</b>	<b>63</b>
3.1	Test de l'algorithme de résolution des ambiguïtés . . . . .	63
3.2	Durée de l'échantillonnage . . . . .	65
3.3	Comparaison des vitesses radiales . . . . .	68
3.3.1	Comparaison des moments . . . . .	70
3.3.2	Spectres d'énergie . . . . .	72
3.3.3	Bruit Doppler et effet du volume d'échantillonnage . . . . .	74
3.3.4	Effet du changement de coordonnées . . . . .	75
3.4	Comparaison des vitesses cartésiennes . . . . .	83
3.4.1	Spectres d'énergie . . . . .	85
3.4.2	Énergie cinétique turbulente . . . . .	87
3.4.3	Cisaillements de Reynolds . . . . .	89
3.5	Conclusions et recommandations . . . . .	91
<b>4</b>	<b>TESTS DU PC-ADP DANS LES DIFFÉRENTS MILIEUX FLUVIAUX . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1	Présentation des sites d'études . . . . .	96
4.1.1	Écoulement uniforme avec rides . . . . .	97
4.1.2	Écoulement uniforme avec dunes . . . . .	101
4.1.3	Écoulement en accélération et décélération dans une mouille . . . . .	104
4.1.4	Séparation verticale et forte rugosité . . . . .	112
4.1.5	Séparation horizontale à l'aval un banc d'accumulation . . . . .	114
4.2	Comparaison entre les environnements . . . . .	118
4.2.1	Vitesse de cisaillement et rugosité . . . . .	118
4.2.2	Profils normalisés . . . . .	120
4.3	Séquence avec les dunes mobiles . . . . .	123
4.4	Conclusions et recommandations . . . . .	138
	<b>DISCUSSION ET CONCLUSION . . . . .</b>	<b>141</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE . . . . .</b>	<b>146</b>



## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Paramètres des ADP pour différentes fréquences d'utilisation (Son-Tek, 2004) . . . . .	15
1.2	Récents études utilisant un ADP. Appareil : fréquence de l'ADP (en MHz) et mode de fonctionnement, (INC) incohérent ; (PC) cohérent ; (BB) broad-band. $F_s$ : fréquence d'échantillonnage en Hz. D : Déploiement (F) fixé sur le lit ; (BF) bateau fixé ; (BM) bateau en mouvement ; (B) appareil orienté vers le bas et (H) vers le haut. Z : profondeur. Buts de l'étude : ( $\bar{v}$ ) vitesses moyennes ; (3D) structure 3D et courants secondaires ; ( $\Omega$ ) vorticité ; (Q) débit ; (T) turbulence ; (SS) sédiment en suspension ; (CF) sédiments en charge de fond ; (S) surface ; ( $\tau$ ) cisaillement ; ( $z_0$ ) rugosité ; (n/d) donnée non-disponible. . . . .	20
2.1	Sommaire des mesures pour la comparaison entre le PC-ADP et l'ADV sur les différents sites de la rivière Rouge. $\bar{u}$ est la vitesse moyenne de l'écoulement, Z, la profondeur d'eau sous l'appareil, NC et TC, le nombre et la taille des cellules du profil. . . . .	46
2.2	Mesures de PC-ADP dans les différents milieux fluviaux. Z est la profondeur d'eau sous l'appareil (en cm), $\bar{u}$ est la vitesse moyenne de l'écoulement (en $\text{cms}^{-1}$ ), $u_{int}$ , l'intensité turbulente (en $\text{cms}^{-1}$ ) et $u_L^*$ la vitesse de cisaillement (en $\text{cms}^{-1}$ ). † : valeurs obtenues à partir de vitesses de mauvaise qualité. n/d : données non disponibles. . . .	50
3.1	Corrélations croisées entre les séries temporelles des fluctuations de vitesses mesurées par le PC-ADP et l'ADV . . . . .	70
3.2	Statistiques pour les mesures du 13 juillet ( $\bar{u} = 30 \text{ cms}^{-1}$ ) . . . . .	70
3.3	Statistiques pour les mesures du 20 ( $\bar{u} = 45 \text{ cms}^{-1}$ ) et du 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ). . . . .	71
3.4	Effet combiné du bruit Doppler et du plus grand volume d'échantillonnage dans les mesures des trois composantes de vitesses ( $u$ , $v$ , $w$ ) du PC-ADP. . . . .	75
3.5	Effet du changement de coordonnées sur la variance des mesures de vitesses des trois composantes de vitesses ( $u$ , $v$ , $w$ ) du PC-ADP. Le signe de la différence de variance entre les deux appareils indique une sous-estimation ou une sur-estimation de la variance par le PC-ADP par rapport à l'ADV. . . . .	76
3.6	Corrélations croisées des séries temporelles des fluctuations de vitesses mesurées par le PC-ADP et l'ADV après le changement de coordonnées. . . . .	78

- 4.1 Milieux fluviaux où le PC-ADP a été déployé pour cette étude.  $Z$  est la profondeur d'eau sous l'appareil (en cm),  $\bar{u}$  est la vitesse moyenne de l'écoulement,  $u_{int}$ , l'intensité turbulente et  $u_L^*$  la vitesse de cisaillement (en  $cms^{-1}$ ). † : valeurs obtenues à partir de vitesses de mauvaise qualité. n/d : données non-disponibles. . . . . 96
- 4.2 Vitesse de cisaillement,  $u_L^*$  en  $cms^{-1}$ , et rugosité,  $z_0$ , déterminées à partir de la loi du mur. † : basé sur des mesures de vitesses décorréées en bas de profil ou trop près du lit. n/d : données non-disponibles. . 121

## LISTE DES FIGURES

1.1	Spectre d'énergie schématisé représentant les différentes échelles turbulentes (modifié de Nikora (2005)). . . . .	10
1.2	Schéma du déploiement d'un ADP (Kostachuk <i>et al.</i> , 2005) . . . . .	14
1.3	(a) Méthode de mesure conventionnelle (incohérente). L'impulsion acoustique a une durée de $\Delta t$ . La résolution verticale, $\Delta z = c\Delta t$ , ( $c$ est la vitesse du son) est représentée par le losange noir. (b) Méthode de mesure cohérente (voir texte) (Lacy et Sherwood, 2004) . . . . .	16
1.4	Représentation de la différence de phase entre les impulsions selon le déplacement des particules en suspension. (A) lorsque la particule est immobile ( $v=0$ ) la différence de phase est nulle. (B) La différence de phase entre les impulsions est proportionnelle au déplacement (vitesse) de la particule. (C) Erreur d'ambiguïté : l'appareil mesurera une vitesse correspondant à celle en (B). Tiré de Gordon (1996) . . . . .	17
1.5	Profils de vitesses logarithmiques obtenus dans la couche-limite turbulente (Lacy et Sherwood, 2004) Le PC-ADP a été déployé à 1 mètre au-dessus du lit dans le delta de Grays Harbor, Washington (profondeur de 9 mètres). . . . .	21
1.6	Cisaillement de Reynolds, $\overline{u'w'}$ , estimé à partir de la technique de la variance sur des intervalles de 10 minutes (Stacey <i>et al.</i> , 1999b) . . . . .	24
1.7	Stabilité des statistiques. (a) Intensité turbulente (écart-type de la vitesse longitudinale) en fonction de la durée de la série temporelle utilisée pour trois profondeurs d'eau (Barua et Rahman, 1998); (b) Vitesse moyenne et écart-type en fonction de la durée d'échantillonnage pour la deuxième cellule à $z=0.264Z$ (Muste <i>et al.</i> , 2004a) . . . . .	25
1.8	(a) NMSE en fonction de la durée d'échantillonnage (b) Fonction d'autocorrélation pour la vitesse longitudinale à trois profondeurs différentes (Muste <i>et al.</i> , 2004a) . . . . .	27
1.9	Effet du changement de coordonnées de l'ADP dans un écoulement homogène et non homogène (Nystrom <i>et al.</i> , 2002). Pour les deux cas, la vitesse mesurée par l'ADP après le changement de coordonnées est la même. Cependant, dans l'écoulement inhomogène en a) la vitesse mesurée ne correspond pas à la vitesse réelle de l'écoulement. Les mouvements verticaux, vers le haut pour un faisceau et vers le bas pour l'autre, ne peuvent être détectés par l'appareil et seront interprétés par celui-ci comme un écoulement dirigé horizontalement identique à celui en b). . . . .	32
1.10	Schéma d'un ADV, modifié de Voulgaris et Trowbridge (1998) . . . . .	37

2.1	Localisation des sites d'étude sur la rivière Rouge et sur la rivière du Nord . . . . .	41
2.2	Localisation du site d'étude sur la rivière Eaton Nord . . . . .	42
2.3	PC-ADP (SonTek) . . . . .	43
2.4	ADV (SonTek) . . . . .	44
2.5	Protocole expérimental dans la rivière Rouge pour la comparaison entre le PC-ADP et l'ADV. a) Les instruments sont connectés aux batteries et aux ordinateurs qui sont sur le bateau gonflable. b) Les deux instruments sont installés pour que l'ADV se retrouve en aval du PC-ADP . . . . .	45
2.6	Schéma explicatif des deux types de mesures pour fin de comparaison	45
2.7	Protocole expérimental dans la rivière Eaton. a) Les instruments sont connectés aux batteries et aux ordinateurs qui sont sur la berge. b) Le PC-ADP est fixé à l'aide d'un trépied. Le même protocole a été utilisé dans la rivière du Nord. . . . .	47
2.8	Sites d'étude sur la rivière Rouge. La flèche représente la direction de l'écoulement. . . . .	47
2.9	Sites de mesures sur la rivière Eaton-Nord. Les flèches représentent la direction de l'écoulement. . . . .	48
2.10	Site sur la rivière du Nord. . . . .	48
2.11	Classification des sites de mesures de PC-ADP. . . . .	49
2.12	Présence d'une zone affectée, à $z=0.17$ mètres du lit, par l'interférence entre les impulsions. . . . .	52
2.13	Série temporelle de la vitesse radiale pour le faisceau 1 de la cellule 5 du PC-ADP et de l'ADV sans résolution des ambiguïtés et avec résolution des ambiguïtés utilisant l'algorithme de Lacy et Sherwood (2004) et celui de <i>Sontek</i> . Les lignes horizontales sont à $V_A/2$ . Tiré de Lacy et Sherwood (2004). . . . .	54
2.14	Résolution des ambiguïtés utilisant l'algorithme de Lacy et Sherwood (2004), LS2004, et celui qui sera utilisé dans cette recherche, LS2004 modifié. . . . .	56
2.15	Série temporelle du rapport signal à bruit mesuré par le PC-ADP illustrant la position du lit. . . . .	62
3.1	Comparaison de la vitesse parallèle au faisceau 1 mesurée par l'ADV et le PC-ADP le 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ). Les données mesurées avec l'ADV ont été filtrées et ré-échantillonnées à 1 Hz. . . . .	64
3.2	Exemples de variation des trois premiers moments statistiques d'une série de vitesse du PC-ADP en fonction de la longueur d'échantillonnage. La ligne pointillée verticale indique la position du temps 900 s (15 minutes). . . . .	66

3.3	Erreur-type ( $SE$ ) de l'estimation de la moyenne, de l'écart-type et de l'asymétrie en fonction de la longueur des séries temporelles (LS).	68
3.4	Exemple de série temporelle de la vitesse radiale du faisceau 1, $v_1$ (13 juillet cellule 2), recueillies dans un écoulement à $30\text{ cms}^{-1}$ à $74\text{ cm}$ au-dessus du lit. . . . .	69
3.5	Exemple de série temporelle de la vitesse radiale du faisceau 1, $v_1$ (13 juillet cellule 6), recueillies dans un écoulement à $30\text{ cms}^{-1}$ à $37\text{ cm}$ au-dessus du lit. . . . .	69
3.6	Distributions des fluctuations de vitesse radiale du faisceau 1 pour les trois environnements. . . . .	72
3.7	Spectres d'énergie de la vitesse radiale, $v_1$ , pour les trois séries du 13 juillet et pour celles du 20 et du 25 juillet. . . . .	73
3.8	Comparaison des vitesses en coordonnées cartésiennes après le changement de coordonnées des vitesses mesurées par le PC-ADP et l'ADV le 13 juillet dans la cellule 2. . . . .	78
3.9	Spectre d'énergie en utilisant les ondelettes <i>Mexican Hat</i> de $v_1$ mesurée par le PC-ADP et l'ADV (13 juillet cellule 6). Les structures encerclées captées par l'ADV ne le sont pas par le PC-ADP. . . . .	79
3.10	Spectre d'énergie en utilisant les ondelettes <i>Mexican Hat</i> de $v_1$ mesurée par le PC-ADP et l'ADV (13 juillet cellule 6). . . . .	79
3.11	Spectres d'énergie globale de la vitesse radiale, $v_1$ , (ondelettes <i>Morlet</i> ) des mesures de PC-ADP et d'ADV recueillies le 13 juillet ( $\bar{u} = 30\text{cms}^{-1}$ ), 20 juillet ( $\bar{u} = 45\text{cms}^{-1}$ ) et 25 juillet ( $\bar{u} = 70\text{cms}^{-1}$ ). . . . .	81
3.12	Spectres d'énergie globale de la vitesse longitudinale, $u$ , (ondelettes <i>Morlet</i> ) des mesures de PC-ADP et d'ADV recueillies le 13 juillet ( $\bar{u} = 30\text{cms}^{-1}$ ), 20 juillet ( $\bar{u} = 45\text{cms}^{-1}$ ) et 25 juillet ( $\bar{u} = 70\text{cms}^{-1}$ ). . . . .	82
3.13	Spectres d'énergie globale de la vitesse verticale, $w$ , (ondelettes <i>Morlet</i> ) des mesures de PC-ADP et d'ADV recueillies le 13 juillet ( $\bar{u} = 30\text{cms}^{-1}$ ), 20 juillet ( $\bar{u} = 45\text{cms}^{-1}$ ) et 25 juillet ( $\bar{u} = 70\text{cms}^{-1}$ ). . . . .	83
3.14	Différence entre la vitesse moyenne mesurée par le PC-ADP et par l'ADV pour les trois composantes de vitesse. . . . .	84
3.15	Différence en % entre l'écart-type des vitesses obtenu par le PC-ADP et par l'ADV pour les vitesses des trois composantes de l'écoulement. . . . .	85
3.16	Exemple de spectres d'énergie. La ligne pointillée indique la pente de $-5/3$ . . . . .	86
3.17	Comparaison de l'énergie cinétique turbulente estimée à partir des mesures de PC-ADP et d'ADV pour trois environnements de vitesses moyennes différentes. . . . .	88
3.18	Comparaison de l'énergie cinétique turbulente des vitesses en coordonnées radiales estimée à partir des mesures de PC-ADP et d'ADV. . . . .	89

3.19	Cisaillements de Reynolds, $-\overline{u'w'}$ , mesurés par le PC-ADP et l'ADV dans les trois environnements. . . . .	90
3.20	Fluctuations de vitesse longitudinale et verticale mesurées par (a) l'ADV et (b) le PC-ADP pour les mesures de vitesses du 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ) du faisceau 3 du PC-ADP à 21 cm au dessus du lit. Les cisaillements de Reynolds, $-\overline{u'w'}$ , estimés à l'aide des deux instruments sont très différents. Les flèches indiquent un temps où les cisaillements instantanés sont de signes opposés. . . . .	91
4.1	Profil des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série R1307 dans un écoulement uniforme au dessus de rides ( $\bar{u} = 32 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 107 \text{ cm}$ ). Nous avons fixé les paramètres du PC-ADP afin d'échantillonner des profils comprenant 10 cellules de 9 cm à 1 Hz. La distance maximale du profil, $r_{max}$ , était de 1.17 m, et 13 à 14 échantillons de vitesses étaient utilisés pour chaque mesure. . . . .	98
4.2	Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R1307 dans un écoulement uniforme au dessus de rides ( $\bar{u} = 32 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 107 \text{ cm}$ ). . . . .	99
4.3	Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R2106-1 dans un écoulement uniforme au dessus de rides ( $\bar{u} = 32 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 70 \text{ cm}$ ). . . . .	101
4.4	Profil des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série R2507 dans un écoulement uniforme au dessus de dunes ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 98 \text{ cm}$ ). Nous avons fixé les paramètres du PC-ADP afin d'échantillonner des profils comprenant 10 cellules de 8 cm à 1 Hz. La distance maximale du profil, $r_{max}$ , était de 1.06 m, et 14 à 15 échantillons de vitesses étaient utilisés pour chaque mesure. . . . .	103
4.5	Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R2507 dans un écoulement uniforme au dessus de dunes ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 98 \text{ cm}$ ). . . . .	103
4.6	Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R2007 dans un écoulement uniforme au dessus de dunes ( $\bar{u} = 45 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 85 \text{ cm}$ ). Le pourcentage de corrélation est indiqué pour les trois dernières cellules. . . . .	104

4.7	Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-1 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 10 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 84 \text{ cm}$ ). Le profil du PC-ADP contient 10 cellules de $7 \text{ cm}$ et a été échantillonné à une fréquence de $1 \text{ Hz}$ utilisant un $r_{max}$ de $1.23 \text{ m}$ et de 14 à 15 échantillons de vitesse par mesure. . . . .	106
4.8	Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-2 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 20 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 93 \text{ cm}$ ). Le PC-ADP a échantillonné dans 10 cellules de $8 \text{ cm}$ utilisant une distance entre les impulsions, $r_{max}$ , de $1.31 \text{ m}$ . . . . .	107
4.9	Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-3 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 20 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 102 \text{ cm}$ ). Le profil du PC-ADP contient 11 cellules de $8 \text{ cm}$ et a été échantillonné à une fréquence de $1 \text{ Hz}$ utilisant un $r_{max}$ de $1.29 \text{ m}$ et de 11 à 12 échantillons de vitesse par mesure. . . . .	108
4.10	Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-4 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 20 \text{ cms}^{-1}$ , $Z = 101 \text{ cm}$ ). Le profil du PC-ADP contient 12 cellules de $8 \text{ cm}$ et a été échantillonné à une fréquence de $1 \text{ Hz}$ utilisant un $r_{max}$ de $1.29 \text{ m}$ et de 11 à 12 échantillons de vitesse par mesure. . . . .	109
4.11	Profil de la a) vitesse moyenne ( $\bar{u}$ ), b) énergie cinétique turbulente ( $\overline{q^2}$ ) et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) mesurés par le PC-ADP pour les quatre endroits de mesure dans la mouille de la rivière Eaton-Nord. . . . .	110
4.12	Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour le profil N2508-1 dans l'écoulement en séparation verticale autour de larges blocs. . . . .	114
4.13	Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série N2508-1 dans l'écoulement en séparation verticale autour de larges blocs. . . . .	115
4.14	Vitesse latérale de la série R1705 dans l'écoulement en séparation horizontale à l'aval d'un banc d'accumulation. La direction de l'écoulement change de $180^\circ$ selon une période de deux minutes. . . . .	116
4.15	Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour le profil R1705-1 dans l'écoulement en séparation horizontale à l'aval d'un banc d'accumulation. . . . .	116

4.16	Spectres d'énergie des composantes longitudinale, latérale et verticale des mesures à $z = 0.5 Z$ des quatre sites dans un écoulement en séparation horizontale. . . . .	118
4.17	Fonctions d'autocorrélation de la composante longitudinale des mesures à $z = 0.5 Z$ des quatre sites dans un écoulement en séparation horizontale. . . . .	119
4.18	Comparaison entre les vitesses de cisaillement mesurées par la loi du mur, $u_L^*$ , et par le profil des cisaillements de Reynolds, $u_R^*$ . La ligne pointillée indique la droite de pente 1. . . . .	122
4.19	Profils normalisés par $u_L^{*2}$ des a) cisaillements de Reynolds et b) énergie cinétique turbulente. Les profils en bleu sont ceux recueillis dans un écoulement uniforme avec rides, en rouge, en présence de dunes et en vert dans un écoulement qui accélère et décélère dans une mouille. . . . .	123
4.20	Rapport signal-à-bruit de chacune des sections consécutives d'une durée de 15 minutes. Le PC-ADP a échantillonné un profil de 7 cellules de 5 cm à 2 Hz. Nous avons fixé la longueur maximale du profil, $r_{max}$ , à 71 cm et de 10 à 11 échantillons de vitesse sont utilisés par mesure. . . . .	126
4.21	a) Rapport signal-à-bruit, b) vitesse longitudinale, c) vitesse verticale et d) $-u'w'$ , cisaillement de Reynolds instantané pour chacune des quatre sections de 15 minutes de la séquence de l'écoulement au-dessus de la dune mobile. . . . .	127
4.22	Représentation schématique de l'écoulement divisé en quatre zones (A, B, C, D et E) au dessus d'une dune (modifié de Best (2005)). La description de ces zones est présentée dans le texte. Les teintes de gris dans les zones de cisaillement représentent un plus grand nombre de particules en suspension. Les mesures de PC-ADP divisées en quatre sections sont situées sur ce schéma. . . . .	129
4.23	Profils semi-logarithmiques des vitesses longitudinales moyennes pour chacune des sections. . . . .	130
4.24	Profils des a) Cisaillements de Reynolds et de b) l'énergie cinétique turbulente estimés en calculant la moyenne de chacune des sections de 15 minutes de la séquence de mesure du PC-ADP au-dessus de la dune mobile. . . . .	132



4.25	a) Énergie cinétique turbulente par unité de volume et b) cisaillements de Reynolds à 6 <i>cm</i> au dessus du lit estimés en calculant la moyenne de chacune des sections de 15 minutes. c) Énergie cinétique turbulente, d) cisaillement de Reynolds et e) position des mesures d'ADV (d'une longueur de 17 minutes) recueillies dans un écoulement de 1.5 <i>m</i> de profondeur et d'une vitesse moyenne de 0.7 <i>ms</i> <sup>-1</sup> par Venditti et Bauer (2005). La hauteur $z^*$ est normalisée par la hauteur de la dune, soit de 32 <i>cm</i> . . . . .	133
4.26	Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement, $w$ , de la section 1 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des cinq cellules centrées à 6 <i>cm</i> , 11 <i>cm</i> , 16 <i>cm</i> et 26 <i>cm</i> au-dessus du lit. Les structures de période de l'ordre de 50 <i>s</i> et de < 16 <i>s</i> sont indiquées sur la figure. . . . .	135
4.27	Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement, $w$ , de la section 2 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des cinq cellules centrées à 6 <i>cm</i> , 11 <i>cm</i> , 16 <i>cm</i> et 26 <i>cm</i> au-dessus du lit. Les structures de période de l'ordre de 16 <i>s</i> et de > 100 <i>s</i> sont indiquées sur la figure. . . . .	136
4.28	Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement, $w$ , de la section 3 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des quatre cellules centrées à 6 <i>cm</i> , 11 <i>cm</i> et 16 <i>cm</i> au-dessus du lit. Les lignes pointillées en blanc indique la position des structures ayant une période de 43 et 112 secondes. . . . .	137
4.29	Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement, $w$ , de la section 4 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des quatre cellules centrées à 6 <i>cm</i> , 11 <i>cm</i> et 16 <i>cm</i> au-dessus du lit. Les lignes pointillées en blanc indique la position des structures ayant une période de 67 et 135 secondes. . . . .	137
4.30	Spectres globaux d'énergie de la vitesse verticale, $w$ , pour les 4 sections et toutes les cellules au dessus du lit. . . . .	139

## LISTE DES ANNEXES

I :	Matrice de changement de coordonnées . . . . .	xxi
II :	Calcul du bruit dans les mesures d'ADP . . . . .	xxii

## NOTATION

ADP	<i>Acoustic Doppler Profiler</i>
ADV	<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>
$b$	ordonnée à l'origine d'une droite
$b_i$	Biais dans le faisceau $i$
$c$	Vitesse du son dans l'eau
$D$	Distance par rapport au PC-ADP
$d$	Distance entre les faisceaux
$d_i$	Effet du volume d'échantillonnage dans le faisceau $i$
$f$	Fréquence
$F$	Fréquence des ondes acoustiques utilisées par l'ADP
$F_D$	Fréquence maximale captée dans un volume de taille $D$
ITS	<i>Integral Time Scale</i>
$L$	Taille du volume d'échantillonnage
$l$	Longueur de mélange
LS	Durée de la série temporelle
$m$	pente d'une droite
$n_i$	Bruit aléatoire dans le faisceau $i$
$N$	Nombre de paires d'impulsions
NC	Nombre de cellules
PC-ADP	<i>Pulse-Coherent Acoustic Doppler Profiler</i>
$\overline{q^2}$	Énergie cinétique turbulente
$\overline{q_{rad}^2}$	Énergie cinétique turbulente des vitesses radiales
$R(\tau)$	Coefficient d'autocorrélation
$r_{max}$	Longueur du profil du PC-ADP
$Re$	Nombre de Reynolds
SE	Erreur sur l'estimation des statistiques

$T$	Durée de l'échantillonnage
$t$	Temps
$T(\theta, \phi)$	Matrice de changement de coordonnées (radiales vers catrésiennes)
$TC$	Taille des cellules
$u$	Composante longitudinale de la vitesse
$u_L^*$	Vitesse de cisaillement estimée par la loi du mur
$u_R^*$	Vitesse de cisaillement estimée par les cisaillements de Reynolds
$\overline{u'w'}$	Cisaillement de Reynolds dans le plan xz
$v_t$	Vitesse au temps t
$v'_t$	Fluctuation de vitesse au temps t
$v_i$	Vitesse radiale du faisceau $i$
$V_A$	Vitesse d'ambiguïté
$v$	Composante latérale de la vitesse
$\overline{v'w'}$	Stress de Reynolds dans le plan yz
$w$	Composante verticale de la vitesse
$\bar{x}$	Moyenne temporelle de x
$ x $	Valeur absolue de x
$Y$	Largeur
$Z$	Profondeur
$z$	hauteur au-dessus du lit
$\alpha$	Paramètre d'anisotropie pour la technique de la variance
$\Delta$	Taille des particules
$\Delta f$	Décalage de fréquence par l'effet Doppler
$\Delta\Phi$	Différence de phase
$\Delta t$	Durée des impulsions acoustiques
$\Delta z$	Résolution spatiale
$\varepsilon$	Taux de dissipation de l'énergie

$\eta$	Micro-échelle de Kolmogorov
$\theta$	Angle des faisceau par rapport à la verticale
$\nu$	Viscosité cinématique
$\rho$	Densité de l'eau
$\Sigma$	Énergie cinétique par unité de volume
$\sigma_n^2$	Variance ajoutée par le bruit dans les vitesses radiales
$\sigma_{un}^2$	Variance ajoutée par le bruit dans la composante de vitesse longitudinale
$\sigma_{vn}^2$	Variance ajoutée par le bruit dans la composante de vitesse latérale
$\sigma_{wn}^2$	Variance ajoutée par le bruit dans la composante de vitesse verticale
$\sigma_{uc}^2$	Variance ajoutée par le changement de coordonnées dans la composante de vitesse longitudinale
$\sigma_{vc}^2$	Variance ajoutée par le changement de coordonnées dans la composante de vitesse latérale
$\sigma_{wc}^2$	Variance ajoutée par le changement de coordonnées dans la composante de vitesse verticale
$\tau$	Délai
$\tau_0$	Contrainte de cisaillement
$\Phi(f)$	Spectre d'énergie
$2\phi$	Angle entre les faisceaux

## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur, Prof. André Roy, pour m'avoir guidé intelligemment durant ma maîtrise. J'ai grandement apprécié l'enthousiasme dont il fait preuve pour l'enseignement et la recherche. Je lui suis reconnaissante pour tout ce que j'ai appris et pour toutes les expériences que j'ai vécues au cours de mon projet de maîtrise.

Un merci énorme à tous les membres du laboratoire d'hydro pour m'avoir accueillie chaleureusement dans leur groupe. Merci à tous ceux qui m'ont aidée sur le terrain : Julie Thérien, Mathieu Roy, Geneviève Marquis, Christine Grenier, Christine Rozon, Francis Gagnon, Olivier Lalonde. J'ajoute à cette liste Geneviève Ali, Vitalie Bondue, Jay Lacey, Bruce MacVicar, Hélène Lamarre, Isabelle Charron, Claudine Boyer et Patrick Verhaar que je remercie pour les conseils tout au long de ces deux années.

Aussi, je voudrais exprimer ma gratitude envers ma famille et mon fiancé, Laurier, pour m'avoir encouragée dans tous mes projets. De plus, merci aux ex-résidents du bunker, aux bananes théoriques volantes et aux matière condensée pour leur folie toujours agréable. Merci également à Karine qui m'a offert un chez moi plus que confortable à Montréal durant les derniers mois.

Enfin, je tiens à souligner le soutien financier de la Chaire de recherche du Canada en dynamique fluviale ainsi que du département de géographie.

## INTRODUCTION

Depuis les trente à quarante dernières années, plusieurs études ont démontré que les écoulements turbulents tendent à s'organiser. Certaines parcelles de fluide ont des mouvements corrélés dans l'espace et le temps et elles forment des structures à différentes échelles. Dans une couche-limite turbulente, les structures à petite échelle interagissent avec des structures à grande échelle présentes dans la zone externe de l'écoulement (Falco, 1977). Le transport de sédiments, les formes au lit et la structure de la couche-limite turbulente sont reliés par un ensemble de rétroactions qui font intervenir plusieurs échelles spatiales et temporelles (Best, 1993). L'étude des structures turbulentes offre une opportunité de comprendre les mécanismes et processus qui ont cours dans les systèmes fluviaux (Clifford et French, 1993a; Roy et Buffin-Bélanger, 2001).

Cependant, ces structures à grande échelle occupent toute la tranche d'eau, ont une dynamique tridimensionnelle et varient rapidement dans le temps et dans l'espace, ce qui rend leur caractérisation difficile. Afin de mieux comprendre ces processus et de caractériser pleinement la dynamique des structures, une information recueillie simultanément en plusieurs points dans l'espace est essentielle. Les profileurs acoustiques à effet Doppler (ADP) ont été développés dans le milieu des années 70 et ont été utilisés pour étudier les vitesses moyennes des courants océaniques et les débits des grandes rivières. L'utilisation des ADP comporte plusieurs avantages par rapport aux sondes ponctuelles (Nystrom *et al.*, 2002). Les ADP mesurent les vitesses en trois dimensions à plusieurs points simultanément sur toute la tranche d'eau. Ils sont non intrusifs (n'affectent pas l'écoulement), ne requièrent pas de calibration et ils sont robustes et faciles à utiliser sur le terrain.

Ces caractéristiques permettent d'augmenter la distribution spatiale des mesures de vitesses et de turbulence et d'accéder à des endroits où il était impossible d'échantillonner. De plus, de nouveaux types d'appareils plus précis ont permis d'étendre le registre d'applications à différents types de milieux pour la mesure des vitesses moyennes et des paramètres turbulents. Ces nouveaux types d'ADP,

les *Pulse-Coherent Acoustic Doppler Profilers* (PC-ADP), par leur résolution spatiale plus grande, ont un grand potentiel pour la mesure des caractéristiques de l'écoulement incluant la turbulence dans les rivières peu profondes.

Cette recherche a donc pour but d'évaluer le potentiel et les limites de l'utilisation de ces nouveaux types de profileurs pour caractériser la turbulence en rivière peu profonde. Afin de réaliser cet objectif, les mesures de PC-ADP seront comparées à des mesures provenant d'un ADV, une sonde ponctuelle de vitesse largement utilisée dans les écoulements turbulents en milieu océanique et fluvial. Ensuite, le PC-ADP sera testé dans différents environnements fluviaux en rivière à lit sablonneux et graveleux. Nous présentons d'abord une revue de littérature sur les difficultés de la mesure de la turbulence ainsi que sur les principes de fonctionnement et d'utilisation des profileurs acoustiques à effet Doppler. Suivront ensuite les méthodes, le protocole expérimental et le traitement des données envisagés pour faire ressortir le potentiel et les limites de la mesure de la turbulence à l'aide du PC-ADP. Finalement, nous présenterons les résultats de la comparaison entre le profileur à effet Doppler et la sonde ponctuelle et des tests de mesure dans les différents environnements fluviaux. Nous proposerons ensuite des recommandations sur l'utilisation du PC-ADP en rivière peu profonde.



# CHAPITRE 1

## CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Ce chapitre exposera les bases nécessaires à la compréhension des défis concernant la caractérisation de la turbulence en milieu fluvial. La première section a pour but de familiariser le lecteur avec les concepts concernant la description et la compréhension actuelle de la turbulence. Suivra ensuite une recension de la littérature concernant les principes physiques et l'utilisation actuelle des profileurs acoustiques à effet Doppler qui mettra en lumière le potentiel et les limites de l'utilisation de ce type d'appareil pour la caractérisation de la turbulence. La dernière partie de cette mise en contexte traitera de la mesure de la turbulence à l'aide de la sonde ponctuelle qui sera utilisée pour la comparaison, le vélocimètre à effet Doppler (ADV).

### 1.1 Turbulence

Pour un écoulement de vitesse moyenne  $\bar{u}$  et de profondeur  $Z$ , le nombre de Reynolds donne une mesure de l'importance relative de l'inertie par rapport aux forces visqueuses :

$$Re = \frac{\bar{u}Z}{\nu} \quad (1.1)$$

où  $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide. Pour des valeurs du nombre de Reynolds en dessous de la valeur critique ( $Re < 500$ ), les forces visqueuses dominent et l'écoulement est dit laminaire. Lorsque le nombre de Reynolds augmente ( $Re > 2000$ ), l'importance des termes inertiels non-linéaires augmente. L'écoulement est alors en état d'instabilité continue (Tritton, 1988) où chaque perturbation induit un changement dans l'écoulement, ce qui réduit la capacité de prédire en détail les mouvements du fluide. Ce type d'écoulement est appelé turbulent. Cependant, on ne peut pas dire que l'écoulement turbulent se comporte de manière complètement

aléatoire puisqu'il comporte des structures organisées. Ces structures organisées couvrent une grande plage d'échelles spatiales et temporelles.

### 1.1.1 Description statistique de la turbulence

Plusieurs quantités statistiques sont généralement utilisées pour décrire l'écoulement turbulent. La description statistique est formulée en termes de quantités moyennes, qui peuvent être comparées d'une expérience à l'autre. La vitesse ( $v_t$ ) de l'écoulement peut se décomposer en une partie moyenne et une partie qui fluctue ( $v'_t$ ) dans le temps ( $t$ ) :

$$v_t = \bar{v} + v'_t \quad (1.2)$$

La vitesse moyenne de l'écoulement détermine plusieurs caractéristiques turbulentes de l'écoulement, comme par exemple, les échelles à laquelle l'énergie est dissipée. La vitesse moyenne,  $\bar{v}$ , est définie ici comme la moyenne temporelle en un point donné :

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T v_t \quad (1.3)$$

où  $T$ , la durée de l'échantillonnage doit être grande en comparaison avec les échelles temporelles impliquées dans les variations de  $v_t$  (Tritton, 1988). La détermination de la durée de l'échantillonnage adéquate pour l'estimation de la moyenne sera discutée plus loin (section 2.5.3).

L'intensité turbulente décrit le degré d'énergie turbulente de l'écoulement. Elle sera définie ici comme étant l'écart-type de la vitesse. L'asymétrie, troisième moment de la fonction de densité de probabilité des fluctuations, renseigne sur la présence de fortes fluctuations peu fréquentes d'un côté ou de l'autre de la moyenne. Le moment de quatrième ordre, l'aplatissement, décrit quant à lui l'intermittence de la turbulence en renseignant sur la concentration des valeurs autour de la moyenne

en se basant sur la distribution normale.

L'énergie cinétique turbulente,  $\overline{q^2}$ , est définie comme la somme des fluctuations de vitesses au carré. Pour un écoulement turbulent en trois dimensions où  $u$  est la vitesse longitudinale,  $v$ , latérale et  $w$ , verticale du fluide,

$$\overline{q^2} = \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}. \quad (1.4)$$

Elle est directement reliée à la quantité d'énergie cinétique par unité de volume,  $TKE$ , associée aux fluctuations de vitesses :

$$TKE = \frac{1}{2} \rho \overline{q^2}. \quad (1.5)$$

Les fluctuations de vitesses donnent lieu à des cisaillements additionnels dans le fluide. Ces forces additionnelles sont appelées cisaillements de Reynolds,  $-\rho \overline{v'_i v'_j}$ . Elles sont définies sous la forme d'un tenseur qui représente les flux d'énergie dans les trois dimensions d'un écoulement turbulent,

$$-\rho \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

où  $u'$ ,  $v'$  et  $w'$  représentent les fluctuations de vitesses dans la direction longitudinale, transversale et verticale de l'écoulement. Sur la diagonale de la matrice on retrouve les cisaillements normaux. Les cisaillements de Reynolds qui agissent sur l'écoulement moyen sont induits par les fluctuations de vitesses, plus précisément par la corrélation entre les composantes des fluctuations. Habituellement, la composante longitudinale-verticale du cisaillement de Reynolds,  $-\rho \overline{u'w'}$ , est la plus utilisée dans l'interprétation du rôle des structures cohérentes turbulentes. Ce cisaillement représente les échanges de quantité de mouvement dans le plan

longitudinal-vertical.

L'écoulement au-dessus d'une surface est affecté par la présence de celle-ci. La condition de non-glissement impose que la vitesse soit nulle à l'interface entre l'écoulement et cette surface, le lit dans le cas d'une rivière (Tritton, 1988). En s'éloignant du lit, la vitesse augmente jusqu'à ce que l'on atteigne la vitesse d'écoulement libre où la friction avec le lit ne se fait plus sentir. La vitesse à l'intérieur de cette couche affectée par la présence du lit, différente de la vitesse d'écoulement libre, est appelée couche-limite turbulente. Dans les écoulements peu profonds, cette couche-limite peut même occuper toute la tranche d'eau.

La distribution de la vitesse longitudinale moyenne dans la couche-limite turbulente,  $\bar{u}$ , en fonction de la hauteur au-dessus du lit,  $z$ , est donnée par la loi du mur :

$$\bar{u} = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.7)$$

où  $z_0$ , longueur de rugosité, est la hauteur au dessus de l'interface où la vitesse moyenne est nulle et  $u^*$  est la vitesse de cisaillement. La constante  $\kappa$  est connue comme la constante de von Karman et sa valeur, établie expérimentalement, est de 0.41 (Tritton, 1988). En traçant un profil semi-logarithmique, soit  $\bar{u}$  en fonction de  $\ln(z)$ , la pente de la relation représentera  $u^*/\kappa$ . La rugosité,  $z_0$  est donnée par la relation  $\exp(-b/m)$ , où  $b$  est l'ordonnée à l'origine de la droite et  $m$  la pente. Le profil semi-logarithmique de la vitesse longitudinale moyenne permet donc d'estimer la vitesse de cisaillement et la longueur de rugosité.

L'énergie cinétique turbulente peut être divisée par  $u^{*2}$  pour obtenir un profil normalisé. Nezu et Nakagawa (1993) ont proposé une augmentation exponentielle de l'énergie cinétique turbulente en partant de la surface vers une valeur maximale à l'interface du lit :

$$\frac{\overline{q^2}}{2u^{*2}} = 4.78 \exp(-2\frac{z}{Z}) \quad (1.8)$$

où  $Z$  est la profondeur.

Le cisaillement  $-\overline{u'w'}$  normalisé par la vitesse de cisaillement est relié à la hauteur au-dessus du lit des écoulements à des nombres de Reynolds élevés par une relation linéaire (Nezu et Nakagawa, 1993) :

$$\frac{\overline{u'w'}}{u^{*2}} = (1 - \frac{z}{Z}) \quad (1.9)$$

De cette équation, il est possible d'obtenir  $u^{*2}$  en extrapolant le profil linéaire des cisaillements de Reynolds.

### 1.1.2 Corrélations et analyse spectrale

La corrélation entre deux fluctuations de vitesses  $v'_1$  et  $v'_2$  est définie par  $\overline{v'_1 v'_2}$  et le coefficient de corrélation comme :

$$r = \overline{v'_1 v'_2} / (\overline{v'^2_1} \overline{v'^2_2})^{1/2} \quad (1.10)$$

La corrélation de la même composante de vitesse à un même point à différents instants est connue comme l'autocorrélation ( $r(\tau)$ ) qui s'exprime par

$$r(\tau) = \frac{\overline{v'(t)v'(t-\tau)}}{\overline{v'^2}} \quad (1.11)$$

On peut représenter ce coefficient de corrélation,  $r(\tau)$ , en fonction du délai,  $\tau$ , afin d'obtenir une courbe d'autocorrélation. Cette représentation permet de déterminer une échelle caractéristique de la turbulence *ITS* (*integral time scale*) :

$$ITS = \int_0^{\tau_0} r(\tau) d\tau \quad (1.12)$$

où  $\tau_0$  est défini comme le temps où  $r(\tau_0) = 0$ .

Une autre méthode pour étudier les échelles associées au mouvement turbulent est l'analyse de Fourier. La transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation,  $\Phi(f)$ , nous permet d'obtenir de l'information sur l'énergie contenue à chacune des fréquences,  $f$ , présentes dans l'écoulement. Le spectre d'énergie,  $\Phi(f)$ , est la représentation graphique de la densité d'énergie en fonction de la fréquence. Il permet donc de répartir l'énergie contenue dans l'écoulement en ses composantes de diverses échelles temporelles.

### 1.1.3 Échelles et structures cohérentes

La décomposition de l'écoulement turbulent en structures de différentes échelles est utile puisque ces échelles jouent des rôles différents dans la dynamique de l'écoulement (Tritton, 1988). On reconnaît qu'il existe dans un écoulement turbulent des structures cohérentes, qui maintiennent des caractéristiques qui sont corrélées dans l'espace et le temps. Ces structures prennent des formes diverses comme des tourbillons, des éjections ou des incursions (Cantwell, 1981). Les cisaillements (normaux et  $-\rho u'w'$ ) sont souvent à leur maximum lors du passage d'une structure turbulente cohérente (Grass, 1971; Lu et Willmarth, 1973; Clifford et French, 1993b). Ce transfert de momentum dans l'écoulement jouerait un rôle important dans le transport des sédiments et dans le développement des formes du lit de la rivière.

Le spectre d'énergie obtenu par les transformées de Fourier permet d'identifier la dynamique des différentes échelles. L'énergie est injectée dans le mouvement turbulent principalement par les plus grandes structures de l'écoulement (qui correspondent aux contributions de basses fréquences). De ces grandes structures, des structures de plus en plus petites sont générées. Ce processus continue jusqu'à ce que la taille des structures soit comparable aux échelles où la viscosité devient im-

portante et qu'elle dissipe l'énergie. Cette séquence est appelée cascade d'énergie. L'échelle où la viscosité devient importante correspond à l'échelle de Kolmogorov,  $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}$  où  $\varepsilon$  est le taux de dissipation de l'énergie. En rivière, la valeur de  $\eta$  est de  $\approx 0.5\text{mm}$  (Nezu et Nakagawa, 1993), ce qui indique que la taille des structures qui se dissipent en chaleur est inférieure à 1 millimètre.

Pour des écoulements ayant des nombres de Reynolds élevés, la différence de taille est très grande entre les structures situées aux extrémités de la cascade d'énergie. La dynamique de la cascade d'énergie et de la dissipation est déterminée par l'énergie injectée par unité de temps dans les grandes structures. La portion du spectre d'énergie qui correspond aux échelles plus petites que celles où l'injection d'énergie a lieu est caractérisée par un taux de transfert d'énergie constant. Cette zone où la viscosité ne fait pas encore effet et l'énergie provient des plus grandes structures est nommée *inertial subrange*. La loi de Kolmogorov décrit le spectre d'énergie à ces échelles par

$$\Phi(f) \propto f^{-5/3} \quad (1.13)$$

La zone où les structures transmettent leur énergie à des structures plus petites sans dissipation ou production d'énergie est donc représentée sur le spectre d'énergie par une pente de  $-5/3$ .

Le spectre d'énergie d'un écoulement se subdivise donc en plusieurs régions représentant des dynamiques différentes (figure 1.1). La première région du spectre représente un domaine de génération turbulente de basse fréquence et caractérise l'interaction entre la turbulence et l'écoulement moyen. Les structures turbulentes qui forment cette région sont étroitement liées aux échelles externes de l'écoulement allant de la largeur à la profondeur du cours d'eau. La deuxième région du spectre en est aussi une de structures relativement grandes, plus petites que la profondeur de l'écoulement mais plus grandes que la distance par rapport au lit où elles se trouvent (Nikora, 2005). Dans cette région, nommée zone intermédiaire, la produc-

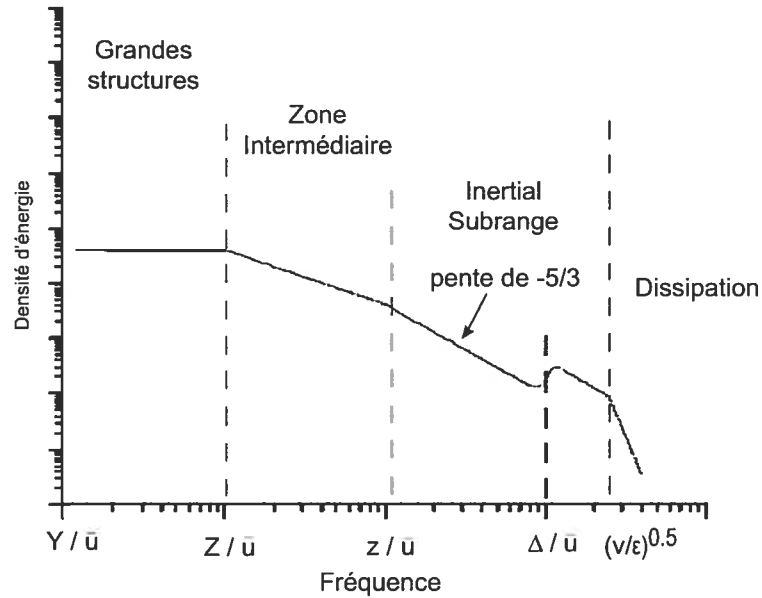


Figure 1.1 – Spectre d’énergie schématisé représentant les différentes échelles turbulentes (modifié de Nikora (2005)).

tion de la turbulence coexiste avec un transfert d’énergie via la cascade (Nikora, 1999). La troisième région, le *inertial subrange*, représente les structures de hautes fréquences, assumées (quasi) isotropiques qui se décomposent en structures plus petites. Sur le spectre d’énergie, la région du *inertial subrange* est caractérisée par une pente de  $-5/3$ . Les structures isotropiques finalement se décomposent en plus petites structures microturbulentes de plus haute fréquence, dissipant leur énergie en chaleur.

## 1.2 Mesure de la turbulence

La turbulence dans un écoulement peut être quantifiée par la mesure de plusieurs variables comme la température, la pression ou la vitesse du fluide. Souvent, en rivière, on utilise des mesures ponctuelles de vitesse instantanée. Idéalement, les mesures doivent résoudre toutes les échelles de l’écoulement. Pour ce faire, les



dimensions du volume d'échantillonnage doivent être plus petites que l'échelle de Kolmogorov. La fréquence de Nyquist de la mesure, qui correspond à la fréquence d'échantillonnage divisée par deux et qui représente la fréquence maximale du signal pouvant être captée, doit être plus grande que l'inverse de l'échelle de Kolmogorov (Nystrom *et al.*, 2002). Aussi, la série de mesures doit être suffisamment longue pour décrire les structures les plus grandes ( $\gg Z$ ). Afin de mesurer la turbulence, certaines spécifications techniques quant à l'instrument de mesure sont également nécessaires (Hinze, 1975). L'appareil doit être

- suffisamment petit pour ne pas trop modifier l'écoulement
- en mesure de répondre rapidement
- suffisamment sensible pour mesurer les fluctuations qui représentent un faible pourcentage de la vitesse moyenne
- stable dans le fluide pour ne pas introduire des tendances fictives dans la mesure à la suite de vibrations ou de mouvements oscillatoires.

De plus, on doit s'assurer de la stationnarité du signal récolté. Un écoulement est statistiquement stationnaire lorsque la vitesse moyenne est indépendante du temps, c'est-à-dire que les tendances dans les données sont beaucoup plus faibles que les fluctuations aléatoires (Soulsby, 1980). Ainsi, la série temporelle des vitesses instantanées est suffisamment longue pour inclure toutes les contributions de basses fréquence et est mesurée à une fréquence élevée pour extraire les mouvements du fluide les plus fins (Soulsby, 1980). Un appareil ne peut résoudre les échelles plus petites que son volume d'échantillonnage. Selon Soulsby (1980), la fréquence d'échantillonnage d'un appareil dont le volume d'échantillonnage est caractérisé par une longueur  $L$  est :

$$F_D \approx 1.4\bar{u}/L \quad (1.14)$$

Une fréquence d'échantillonnage plus grande que  $F_D$  ne donnera aucune information supplémentaire (Soulsby, 1980).

Cependant, lorsque nous ne disposons pas d'un appareil idéal qui mesure toutes les échelles de la turbulence en même temps, nous devons déterminer quelles caractéristiques de la turbulence peut résoudre l'appareil et se demander si ces échelles conviennent au problème que l'on tente de résoudre. Un appareil dont le volume d'échantillonnage est petit et qui mesure à une fréquence élevée captera les fluctuations à petites échelles qui forment le *inertial subrange*. Un appareil dont le volume d'échantillonnage est plus grand et qui échantillonne à une fréquence plus basse ne captera pas les plus petites fluctuations de vitesses. Il pourra cependant nous renseigner sur les structures à grande échelle qui contiennent la plus grande partie de l'énergie de l'écoulement.

La mesure de la turbulence représente encore aujourd'hui un défi de taille et il existe une large gamme de techniques et d'instruments pour obtenir des données sur la turbulence de l'écoulement, que ce soit en laboratoire ou en milieu naturel. Chaque type d'instruments présente des avantages et désavantages dont il faut tenir compte dans l'interprétation des données relatives à la turbulence. Par exemple, en rivière, on mesure la turbulence à partir des fluctuations de vitesses et on utilise couramment les courantomètres à hélices, électromagnétiques et acoustiques. Les courantomètres acoustiques sont relativement récents et ils se présentent sous forme d'un profileur (ADP) ou d'un vélocimètre ponctuel (ADV). Dans les sections qui suivent, nous présenterons les caractéristiques détaillées des profileurs acoustiques et décrirons brièvement les ADV qui sont plus connus en géomorphologie fluviale.

### 1.3 Profileurs acoustiques à effet Doppler

La compréhension du fonctionnement des profileurs acoustiques à effet Doppler est cruciale pour évaluer ses capacités et ses limites dans la mesure de l'écoulement turbulent. Dans cette section, les principes physiques des ADP incohérents ou conventionnels seront d'abord expliqués. Deux améliorations développées récemment à partir de cette technique de mesure, le *pulse-coherent acoustic Doppler Profiler* (PC-ADP) et le *broad-band* (BB-ADP), seront ensuite décrites. Nous pré-

senterons également une revue de la littérature qui recensera les différents types d'utilisation de ces appareils afin de clarifier leur apport à l'étude des processus reliant l'écoulement et le transport de sédiments dans différents milieux. Des exemples de mesures de l'écoulement en océan, estuaire, milieu côtier et rivière viendront montrer comment les ADP ont été utilisés. Finalement, les limites et difficultés rencontrées dans ces différentes études seront discutées, suggérant ainsi de nouvelles pistes pour améliorer la performance de ce type d'appareil.

### 1.3.1 Principes physiques

#### 1.3.1.1 ADP

Les ADP utilisent l'effet Doppler pour mesurer la vitesse de l'écoulement :

$$\Delta f = F \left( \frac{2V}{c} \right) \quad (1.15)$$

où  $\Delta f$  est le changement de fréquence (décalage Doppler) du signal réfléchi par les particules dans l'écoulement,  $F$  est la fréquence des ondes émises par l'appareil,  $c$  est la vitesse du son dans l'eau et  $V$  la vitesse relative des particules par rapport à la source. L'ADP émet des impulsions acoustiques focalisées à l'intérieur de faisceaux à une fréquence donnée. Les impulsions se propagent dans la colonne d'eau, elles sont ensuite réfléchies par les particules en suspension (e.g. sédiments, bulles d'air) et une partie de l'énergie revient vers l'appareil. L'appareil mesure la fréquence de cette impulsion réfléchie et calcule le décalage Doppler, soit la différence de fréquence entre les deux signaux. Ce décalage est donc proportionnel à la composante parallèle au faisceau de la vitesse des particules en suspension (équation 1.15).

La position de la mesure de vitesse à l'intérieur de la colonne d'eau peut être déterminée par le temps de retour du signal. En mesurant les signaux à des temps différents, l'ADP obtient des mesures de vitesses à plusieurs positions dans la colonne d'eau. Le profil de vitesses est donc divisé en cellules, où chacune d'elles représente une moyenne des signaux captés pendant une certaine période de temps

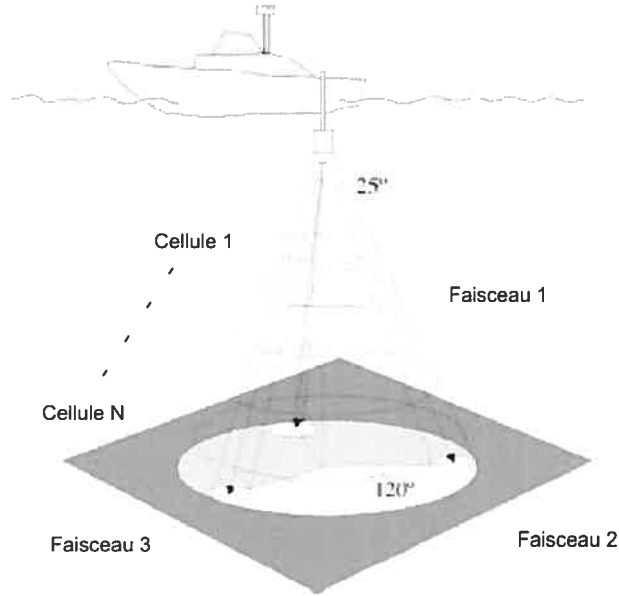


Figure 1.2 – Schéma du déploiement d'un ADP (Kostachuk *et al.*, 2005)

(Kostachuk *et al.*, 2005).

Les ADP utilisent généralement trois ou quatre faisceaux divergents faisant un angle par rapport à la verticale de 15° à 25° (Figure 1.2). Étant donné que l'angle par rapport à la verticale et l'angle entre les faisceaux sont connus, les vitesses longitudinales, verticales et latérales peuvent être estimées à partir des vitesses mesurées parallèlement aux faisceaux. Par exemple, pour un ADP utilisant trois faisceaux, la matrice de transformation  $T(\theta, \phi)$  relie les vitesses radiales,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  aux vitesses cartésiennes,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  :

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = T(\theta, \phi) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

où  $T(\theta, \phi)$  est une matrice  $3 \times 3$  et dépend uniquement des angles entre les trois faisceaux,  $2\phi$ , et l'angle qu'ils font par rapport à la verticale,  $\theta$  (voir annexe I). Les vitesses cartésiennes,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ , correspondent aux vitesses longitudinale,  $u$ , latérale,  $v$ , et verticale,  $w$ , lorsque le profileur est orienté parfaitement avec l'écoulement.

Cependant, ce changement de coordonnées est seulement possible si, pour chaque cellule à chaque instant, la vitesse est la même pour les trois faisceaux pour les trois composantes des vitesses dans un système cartésien. Ceci signifie que le changement de coordonnées par la matrice  $T(\theta, \phi)$  n'est valide que si l'écoulement est homogène à l'intérieur du volume formé par les faisceaux.

L'atténuation de l'énergie acoustique dans l'eau est le phénomène qui limite la profondeur maximale sondée. L'atténuation des impulsions acoustiques dépend de la fréquence des ondes utilisées par l'appareil. Plus la fréquence est élevée, plus les impulsions s'atténueront rapidement et moins l'ADP pourra sonder profondément dans la colonne d'eau. La profondeur maximale varie entre 3 et 180 mètres avec une résolution de 0.15 à 1 mètres selon la fréquence utilisée (tableau 1.1).

Fréquence de l'ADP	Profondeur	Taille minimale des cellules
0.25 MHz	120-180 m	1.00 m
0.50 MHz	70-120 m	1.00 m
1.00 MHz	25-40 m	0.40 m
1.50 MHz	10-14 m	0.25 m
3.00 MHz	3-6 m	0.15 m

Tableau 1.1 – Paramètres des ADP pour différentes fréquences d'utilisation (Son-Tek, 2004)

La résolution verticale dépend de la durée de l'impulsion émise par l'appareil. Pour détecter un changement de fréquence  $\Delta f$  une impulsion doit avoir une durée de  $\Delta t$  de sorte que  $\Delta f * \Delta t$  soit de l'ordre d'un cycle complet. La résolution verticale est donc de  $\Delta z = c\Delta t$  où  $c$  est la vitesse du son dans l'eau (voir Figure 1.3). La résolution verticale correspond à la taille minimale d'une cellule et est de 15 cm pour les appareils utilisant les plus hautes fréquences d'ondes acoustiques.

### 1.3.1.2 ADP cohérent

Les ADP *pulse coherent* (PC-ADP) sont une amélioration des profleurs acoustiques à effet Doppler. Les systèmes utilisant la technologie cohérente obtiennent

une meilleure résolution spatiale (quelques centimètres) en utilisant une paire d'impulsions très courtes ( $\Delta t \approx 10^{-5} s$ ) (Lacy et Sherwood, 2004). L'instrument émet deux impulsions séparées d'un délai  $\tau \gg \Delta t$  et mesure la différence de phase entre les deux signaux réfléchis au temps  $t$  et  $t + \tau$  (Figure 1.3). Si la vitesse de l'écoulement le long du faisceau est de  $V$ , les particules en suspension dans l'eau parcourront une distance de  $V\tau$  durant l'intervalle  $\tau$  (Lacy et Sherwood, 2004).

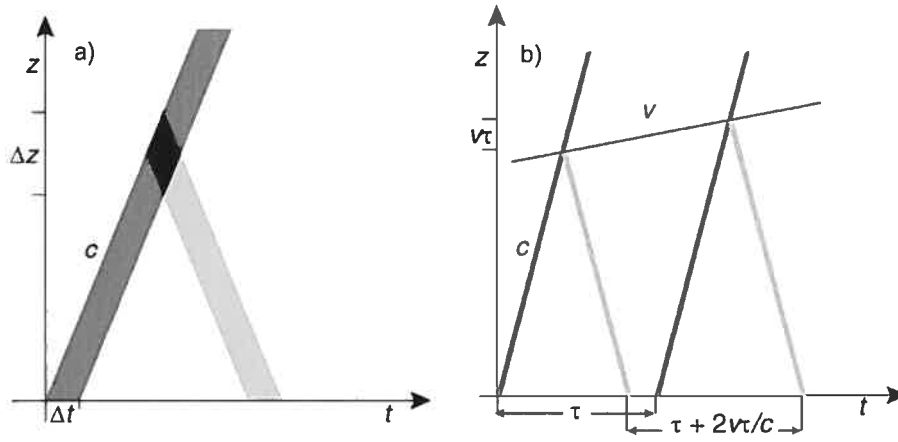


Figure 1.3 – (a) Méthode de mesure conventionnelle (incohérente). L'impulsion acoustique a une durée de  $\Delta t$ . La résolution verticale,  $\Delta z = c\Delta t$ , ( $c$  est la vitesse du son) est représentée par le losange noir. (b) Méthode de mesure cohérente (voir texte) (Lacy et Sherwood, 2004)

Le temps de parcours aller-retour de la seconde impulsion entre l'émetteur et la particule diffère de  $2V\tau/c$  par rapport au temps de parcours du premier faisceau. La différence de phase entre les deux impulsions est donc de  $2\pi F * 2V\tau/c$ . L'instrument utilise ce décalage de phase,  $\Delta\Phi$ , entre les deux signaux réfléchis au temps  $t$  et  $t + \tau$  pour déterminer la vitesse :

$$V = c\Delta\Phi/4\pi F\tau \quad (1.16)$$

L'utilisation des deux impulsions est ce qui donne à la méthode cohérente une meilleure résolution spatiale mais elle introduit des erreurs d'ambiguïté (Lhermitte et Serafin, 1984). Ce type d'erreur est causé par le fait qu'une mesure de phase ne

peut se faire qu'entre 0 et  $2\pi$  ou  $360^\circ$  (voir figure 1.4).

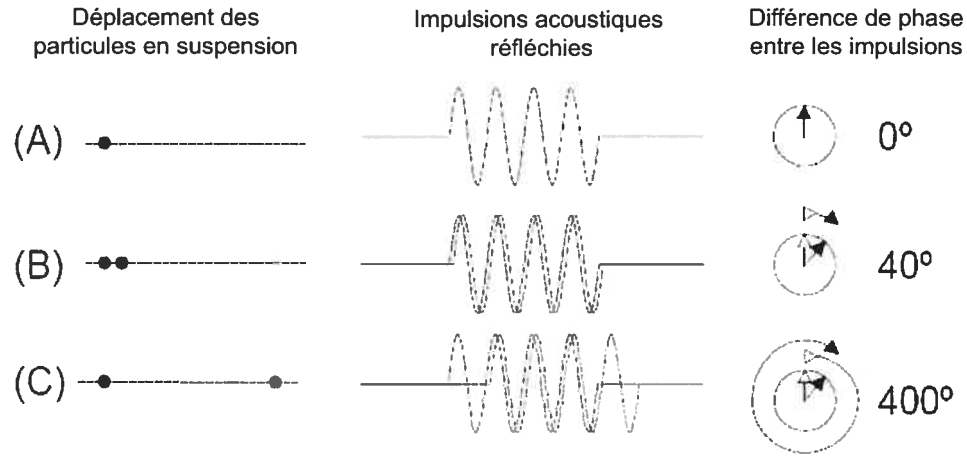


Figure 1.4 – Représentation de la différence de phase entre les impulsions selon le déplacement des particules en suspension. (A) lorsque la particule est immobile ( $v=0$ ) la différence de phase est nulle. (B) La différence de phase entre les impulsions est proportionnelle au déplacement (vitesse) de la particule. (C) Erreur d'ambiguïté : l'appareil mesurera une vitesse correspondant à celle en (B). Tiré de Gordon (1996)

La vitesse d'ambiguïté,  $V_A$ , est la vitesse qui correspond à une différence de  $2\pi$  ou  $360^\circ$  entre les deux impulsions. Une erreur d'ambiguïté survient lorsque la vitesse réelle se trouve à l'extérieur de cet intervalle (voir figure 1.4(C)). La vitesse mesurée par l'appareil sera alors différente de la vitesse réelle d'un facteur correspondant à un multiple de  $V_A$ .

Le délai entre les impulsions,  $\tau$ , fixe la valeur de la vitesse d'ambiguïté (en posant  $\Delta\phi = 2\pi$  dans l'équation 1.16). La seconde impulsion n'est pas émise par l'appareil tant que la réflexion de la première impulsion sur les particules les plus éloignées du profil n'est pas revenue à l'appareil. On peut donc relier  $\tau$  à la distance maximale par rapport à l'appareil que la première impulsion aura le temps de franchir avant que la deuxième ne soit émise par l'appareil,  $r_{max}$ . Cette distance est déterminée par la vitesse du son dans l'eau :  $r_{max} = \tau c/2$ . La vitesse d'ambiguïté s'exprime alors comme :

$$V_A = \frac{c^2}{4Fr_{max}} \quad (1.17)$$

L'équation 1.17 illustre la relation imposée par la méthode de mesure cohérente entre la longueur maximale du profil et la vitesse d'ambiguïté (Lhermitte et Serafin, 1984). Plus la longueur du profil est grande, plus faible sera la vitesse mesurée sans ambiguïté. Cette relation entre la longueur du profil et la vitesse maximale mesurée sans ambiguïté est inhérente au système de mesure cohérent. Contrairement à l'ADP conventionnel où la longueur du profil dépend de l'atténuation des ondes acoustiques dans l'eau, la longueur du profil mesuré par un PC-ADP est limitée par la vitesse de l'écoulement.

Ce type d'appareil est appelé cohérent puisqu'il corrèle les deux impulsions réfléchies sur une particule en suspension afin de déterminer la différence de phase entre elles. La méthode de la covariance (Miller et Rochwarger, 1972) est utilisée pour corrélérer les échos provenant des réflexions sur les particules dans la même cellule. Le fonctionnement des PC-ADP est basé sur le fait que les réflexions des deux impulsions sur la même particule en suspension ont la même fréquence. Dans ce cas, la corrélation entre les deux impulsions est de 100%. Ceci est possible seulement si les particules demeurent à l'intérieur de la même cellule et ne changent pas de direction ou de vitesse entre les impulsions. Lorsque cette condition n'est pas respectée, la corrélation entre les impulsions diminue et affecte les mesures de vitesses.

### 1.3.1.3 ADP Broad-Band

Les problèmes de la méthode cohérente apportés par la relation entre la vitesse et la longueur maximale du profil pourraient être réduits si le système n'était plus contraint à garder le temps entre les impulsions plus grand que le temps de propagation pour atteindre la profondeur maximale. Les systèmes *broad-band* ne



sont pas affectés par ce problème puisqu'ils peuvent recevoir les réflexions de plusieurs impulsions en même temps (Brumley *et al.*, 1999). En réduisant l'intervalle de temps entre les impulsions ( $\tau$ ), la vitesse maximale mesurée sans ambiguïté peut être augmentée (voir l'équation 1.17). L'espacement entre les paires d'impulsions peut être aussi grand que possible pour permettre de couvrir la profondeur désirée. Les principes de fonctionnement sont décrits en détail dans Brumley *et al.* (1999).

La méthode *broad-band* peut être vue comme un compromis entre le système incohérent et cohérent. La résolution spatiale et la longueur maximale du profil qui peuvent être obtenues avec un système *broad-band* sont généralement intermédiaires entre les deux méthodes décrites plus haut.

### 1.3.2 Applications des ADP en milieu naturel

Plusieurs études en océanographie, et plus récemment en estuaire, milieu côtier et en rivière, ont utilisé les ADP selon les trois modes de fonctionnement décrits dans la section 1.3.1. Le tableau 1.2 présente, à titre d'exemples, les plus récentes études effectuées à partir d'ADP. Certaines études seront décrites plus en détail dans les sections suivantes. Nous présenterons dans cette revue de littérature les apports de l'utilisation des ADP à l'étude des propriétés moyennes et turbulentes des écoulements premièrement, en océans, estuaires et milieux côtiers et deuxièmement, en rivières.

	Appareil	$F_s$	D	Z(m)	Buts
Océans, estuaires et milieux côtiers					
Lohrmann <i>et al.</i> (1990)	0.3 PC	4	B,H	10	T
Berezutskii <i>et al.</i> (1991)	0.075 INC	0.005	BM,H	700	3D
Gargett (1994)	0.3;0.6 INC	0.5	BM,B	90-370	T
Visbeck et Fischer (1995)	0.15 INC	0.006	F,H	350	S
Cheng <i>et al.</i> (1999)	1.2 BB	0.008	F,B	1.6	$\tau$
Lu et Lueck (1999a)	0.6 BB	1.3	F,B	25	$\bar{v}$ , $\tau$
Lu et Lueck (1999b)	0.6 BB	1.3	F,B	25	T
Stacey <i>et al.</i> (1999a)	1.2 BB	1	BF,B	9	T
Stacey <i>et al.</i> (1999b)	1.2 BB	0.525	BF,B	9	T
Wewetzer <i>et al.</i> (1999)	0.3 INC	n/d	B	13	3D
Lu <i>et al.</i> (2000)	0.6 BB	1.3	F,B	25	T
Fischer <i>et al.</i> (2004)	0.15 INC	0.0003	BF,B	n/d	$\bar{v}$
Gartner (2004)	1.2;2.4 BB	0.001	F,B	2	SS
Kawanisi (2004)	1.5 PC	0.3	F,B	< 1	T
Kostachuk <i>et al.</i> (2005)	1.5 INC	0.2	BM,B	8-10	CF
	0.5 INC	n/d	BM,B	60	SS
Kostachuk <i>et al.</i> (2004)	1.5 INC	0.2	BM,B	10	$\tau$
Lacy et Sherwood (2004)	1.5 PC	1	F,B	< 1	$\tau$ , $z_0$
Rivières					
Barua et Rahman (1998)	0.3 INC	0.1-0.2	BF,B	8-10	T
Richardson et Thorne (1998)	0.3 INC	n/d	BM,B	8	3D
Gonzalez-Castro <i>et al.</i> (2000)	0.6 BB	1	H	4	T
Rennie <i>et al.</i> (2002)	1.5 INC	0.2	BF,B	2-6	CF
Yorke et Oberg (2002)	0.3-1.2 INC	n/d	BM,B	n/d	Q
Shields <i>et al.</i> (2003)	1.2 BB	1	BM,B	1-3	$\bar{v}$ , $\Omega$
Dargahi (2004)	n/d	n/d	BF,B	2-10	3D
Muste <i>et al.</i> (2004b)	0.6 INC	3	BM,B	5	$\bar{v}$ , Q
Muste <i>et al.</i> (2004a)	1.2 INC	0.625	BF, B	3.5	T
Dinehart et Bureau (2005)	1.2 BB	0.8-1	BM, B	7-15	3D, SS
Shields et Rigby (2005)	1.2 BB	1	BM,B	2.5	3D, $\Omega$
Tilston et Biron (sous presse)	1.5 PC	2	F,B	< 1	3D, T

Tableau 1.2 – Récentes études utilisant un ADP. Appareil : fréquence de l'ADP (en MHz) et mode de fonctionnement, (INC) incohérent ; (PC) cohérent ; (BB) broadband.  $F_s$  : fréquence d'échantillonnage en Hz. D : Déploiement (F) fixé sur le lit ; (BF) bateau fixé ; (BM) bateau en mouvement ; (B) appareil orienté vers le bas et (H) vers le haut. Z : profondeur. Buts de l'étude : ( $\bar{v}$ ) vitesses moyennes ; (3D) structure 3D et courants secondaires ; ( $\Omega$ ) vorticité ; (Q) débit ; (T) turbulence ;

(SS) sédiment en suspension ; (CF) sédiments en charge de fond ; (S) surface ; ( $\tau$ ) cisaillement ; ( $z_0$ ) rugosité ; (n/d) donnée non-disponible.

### 1.3.2.1 Océans, estuaires et milieux côtiers

Un grand nombre d'études en océanographie utilisent les ADP afin de mesurer les courants à grande échelle. Ces études utilisent des ADP à plus basses fréquences (75-300 kHz) qui couvrent donc la tranche d'eau jusqu'à une profondeur de plus de 100 mètres. Les ADP sont soit fixés au fond de l'océan, descendus dans l'écoulement à l'aide de câbles ou utilisés directement à partir d'un bateau (e.g. Visbeck et Fischer, 1995; Berezutskii *et al.*, 1991; Fischer *et al.*, 2004; Hall *et al.*, 2004). Les océanographes peuvent ainsi sonder l'écoulement sur toute la tranche d'eau, inaccessible avec des sondes ponctuelles, mais avec une résolution assez grossière (taille des cellules de plusieurs mètres).

Le développement des nouveaux types d'ADP, cohérent et *broad-band*, a permis l'utilisation des profileurs pour atteindre de nouveaux objectifs. L'habileté à mesurer des profils de vitesses à haute résolution facilite l'étude de la dynamique à l'intérieur de la couche-limite de l'écoulement (Lacy et Sherwood, 2004). Ces ADP à plus grande précision sont utilisés dans le premier mètre au-dessus du lit des estuaires ou des milieux côtiers afin de résoudre la couche-limite turbulente (e.g. Cheng *et al.*, 1999; Betteridge *et al.*, 2002, 2003; Lacy et Sherwood, 2004).

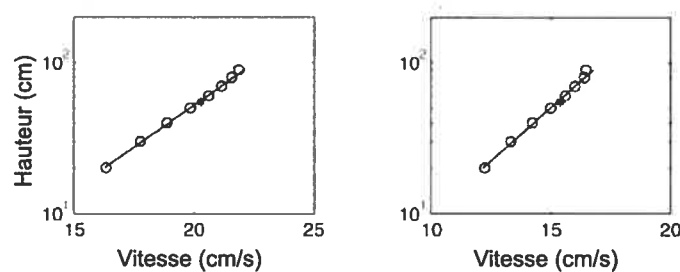


Figure 1.5 – Profils de vitesses logarithmiques obtenus dans la couche-limite turbulente (Lacy et Sherwood, 2004) Le PC-ADP a été déployé à 1 mètre au-dessus du lit dans le delta de Grays Harbor, Washington (profondeur de 9 mètres).

La figure 1.5 représente les profils de vitesse obtenus à l'aide d'un PC-ADP

(SonTek) de 1.5 MHz. La comparaison des vitesses mesurées par le PC-ADP avec un ADVF (Field Acoustic Doppler Velocimeter) de Sontek a démontré que le PC-ADP mesure avec précision jusqu'à des vitesses de  $60 \text{ cm s}^{-1}$ . Cheng *et al.* (1999) ont déployé un ADP *broad-band* (RDI) de 1.2 MHz afin d'obtenir un profil des vitesses entre 9 cm et 1.6 mètres au dessus du lit de la Baie de San Francisco, Californie (profondeur de 16 mètres). Ces deux types d'instruments permettent de diviser l'écoulement à l'intérieur du premier 10% de la tranche d'eau près du lit en cellules de 5 à 10 cm afin d'obtenir des profils de vitesses précis dans la couche-limite turbulente. De ces profils, la vitesse de cisaillement (le cisaillement au lit) et la longueur de rugosité peuvent être estimées. La grande résolution verticale dans le profil de vitesse diminue les erreurs dans l'estimation de ces paramètres (Cheng *et al.*, 1999).

Plusieurs études se sont intéressées à la caractérisation de la turbulence à partir de mesures d'ADP. Gargett (1994) a développé une méthode d'estimation de la dissipation d'énergie à partir de mesures des structures turbulentes à grandes échelles. Elle utilise un ADP à quatre faisceaux auquel un cinquième faisceau vertical est ajouté. Cette technique permet de mesurer la turbulence même si l'écoulement n'est pas homogène à l'intérieur du volume d'échantillonnage. Lohrmann *et al.* (1990) ont présenté une méthode d'estimation directe des cisaillements de Reynolds,  $\overline{u'w'}$  et  $\overline{v'w'}$ , et de l'énergie cinétique turbulente,  $\overline{q^2}/2$ , à partir d'un ADP à quatre faisceaux appelée technique de la variance. Cette méthode qui repose sur la comparaison de la variance de la vitesse entre les faisceaux opposés a été utilisée par la suite dans un grand nombre d'études en estuaires et milieux côtiers (e.g. Stacey *et al.*, 1999a,b; Lu et Lueck, 1999b; Lu *et al.*, 2000; Rippeth *et al.*, 2002; Simpson *et al.*, 2004). Pour un ADP ayant quatre faisceaux, les vitesses parallèles aux faisceaux doivent d'abord être décomposées en une composante moyenne,  $\overline{v_1}, \overline{v_2}, \overline{v_3}, \overline{v_4}$  et une fluctuation de vitesses,  $v'_1, v'_2, v'_3, v'_4$ . La méthode de la variance permet d'estimer, directement à partir des fluctuations de vitesse mesurées par l'ADP, les deux composantes du cisaillement de Reynolds :

$$-\overline{u'w'} = \frac{\overline{v_2'^2} - \overline{v_1'^2}}{2 \sin 2\theta} \quad (1.18)$$

$$-\overline{v'w'} = \frac{\overline{v_4'^2} - \overline{v_3'^2}}{2 \sin 2\theta} \quad (1.19)$$

Cependant, pour l'énergie cinétique turbulente, une telle expression n'est pas possible dû à un manque d'information (que Gargett (1994) avait compensé par l'ajout d'un faisceau). Lohrmann *et al.* (1990) ont proposé l'utilisation du paramètre  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{\overline{w'^2}}{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}} \quad (1.20)$$

Cette relation entre  $u'$ ,  $v'$  et  $w'$  permet de remplacer  $w'$  dans les équations pour obtenir l'énergie cinétique turbulente :

$$\overline{q^2}/2 = \frac{(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha \cot^2 \theta} \frac{(\overline{v_1'^2} + \overline{v_2'^2} + \overline{v_3'^2} + \overline{v_4'^2})}{4 \sin^2 \theta} \quad (1.21)$$

où  $\theta$  est l'angle des faisceaux par rapport à la verticale. Cependant, nous devons connaître la valeur de  $\alpha$  pour le type d'écoulement étudié afin d'obtenir l'énergie cinétique turbulente. Ces équations pour estimer les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique sont valides seulement si l'écoulement est homogène à l'intérieur du volume d'échantillonnage de chaque cellule, volume qui est fonction de l'élargissement des faisceaux. La figure 1.6 donne un exemple d'estimation des cisaillements de Reynolds dans un estuaire par la méthode de la variance (Stacey *et al.*, 1999b). Ces profils de vitesses ont été obtenus avec un ADP *broad-band* de 1200 kHz à quatre faisceaux, déployé à la surface à partir d'un bateau ancré en position fixe.

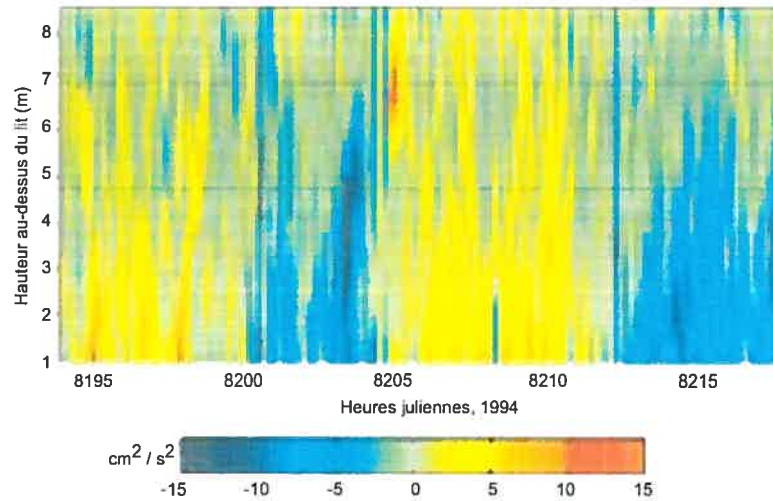


Figure 1.6 – Cisaillement de Reynolds,  $\overline{u'w'}$ , estimé à partir de la technique de la variance sur des intervalles de 10 minutes (Stacey *et al.*, 1999b)

Les estimations des cisaillements de Reynolds calculés à partir de la technique de la variance ont également été comparées à celles provenant d'un ADV dans un environnement marin en présence de vagues (Souza et Howarth, 2005). Les estimations des cisaillements de Reynolds sont en accord avec ceux mesurés à partir d'un ADV sauf dans le cas de vagues hautement énergétiques lors de tempêtes.

### 1.3.2.2 Rivières

Une grande partie de la littérature sur l'utilisation des ADP en rivière concerne la mesure de débits (e.g. Gordon, 1989; Yorke et Oberg, 2002; Muste *et al.*, 2004b). Cette application des ADP en rivière ne sera pas abordée dans ce travail. Quelques études utilisent le potentiel tridimensionnel des ADP afin de caractériser les courants secondaires, soient les vitesses dans le plan perpendiculaire à l'axe primaire de l'écoulement. Ces études utilisent habituellement les ADP en mode incohérent déployés à partir d'un bateau en se déplaçant sur des transects. Dargahi (2004) a utilisé un ADP de la même façon pour mesurer les courants secondaires de la rivière Klarälven (Suède) afin de valider sa modélisation 3D. Dans le but de caractériser

les habitats en rivière, Shields *et al.* (2003) et Shields et Rigby (2005) ont utilisé les vitesses mesurées avec un ADP afin d'évaluer la vorticité et la circulation. Dinehart et Bureau (2005) ont cartographié les vitesses en trois dimensions provenant d'un ADP ainsi que l'intensité du signal. Il ont pu quantifier le lien entre le transport de sédiments en suspension et les courants secondaires.

Des douze références citées au tableau 1.2, quatre études s'intéressent aux propriétés turbulentes de l'écoulement. Comparativement aux études portant sur le débit ou sur les courants secondaires, où les mesures se font à partir d'un bateau se déplaçant le long d'un transect, les mesures de paramètres turbulents doivent être effectuées en position fixe (Muste *et al.*, 2004b).  tant donné que les études effectuées dans les océans et estuaires ne peuvent être que partiellement appliquées aux rivières, puisque les échelles de l'écoulement sont complètement différentes et que le potentiel de l'appareil est encore peu connu dans ce type d'environnements, les travaux effectués en rivière portent sur le développement de méthodologies. L'aspect méthodologique commun aux trois études concerne la durée d'échantillonnage nécessaire pour estimer des paramètres turbulents comme l'intensité turbulente. La Figure 1.7 illustre deux analyses de stabilité des valeurs statistiques en fonction de la durée de l'échantillonnage en rivière.

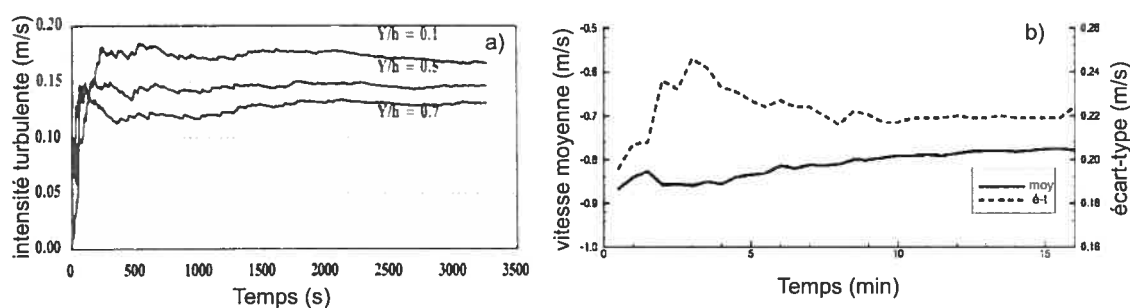


Figure 1.7 – Stabilité des statistiques. (a) Intensité turbulente ( cart-type de la vitesse longitudinale) en fonction de la durée de la série temporelle utilisée pour trois profondeurs d'eau (Barua et Rahman, 1998); (b) Vitesse moyenne et écart-type en fonction de la durée d'échantillonnage pour la deuxième cellule à  $z=0.264Z$  (Muste *et al.*, 2004a)

Barua et Rahman (1998) et Muste *et al.* (2004a) ont respectivement avancé que les séries devraient être d'une longueur de 15 et de 11 minutes. Barua et Rahman (1998) ont échantillonné dans un écoulement allant de 1.3 à 1.8  $ms^{-1}$  avec une profondeur moyenne de 10  $m$  et Muste *et al.* (2004a) dans une rivière où l'écoulement était d'environ 1  $ms^{-1}$  et de 3.5 mètres de profondeur. Les échelles turbulentes de l'écoulement ont également été prises en compte afin d'inclure un nombre suffisant d'événements turbulents dans la série temporelle. Barua et Rahman (1998) ont identifié des cycles de 11 à 20 secondes à partir de spectres de puissances de l'écoulement de 1.3 à 1.8  $ms^{-1}$  et ont conclu qu'une série de 900 secondes incluait plus de 45 à 80 cycles, ce qui est en accord avec les recommandations de Soulsby (1980). Muste *et al.* (2004a) se sont basés sur les recommandations de Nezu et Nakagawa (1993) afin d'évaluer les échelles turbulentes de l'écoulement et ont déterminé que la durée d'échantillonnage devrait se situer entre 12.5 et 25 minutes afin d'inclure les plus grandes structures de l'écoulement.

Gonzalez-Castro *et al.* (2000) ont utilisé l'*ITS* (*integral time scale*) pour évaluer l'erreur normalisée sur l'estimation de la vitesse moyenne (NMSE) d'une série de longueur  $T \gg ITS$  :

$$NMSE = (\overline{u_T} - \bar{u})^2 / \overline{u^2} \approx 2(ITS/T) \quad (1.22)$$

où  $\bar{u}$  est la vitesse moyenne de l'ensemble,  $\overline{u_T}$  est l'estimation de la vitesse moyenne basée sur la série de longueur  $T$  et  $\overline{u^2}$  est la variance de la vitesse longitudinale. La figure 1.8 illustre les résultats de Muste *et al.* (2004a) de l'erreur sur l'estimation de la vitesse moyenne (NMSE), basés sur les suggestions de Gonzalez-Castro *et al.* (2000), et de la fonction d'autocorrélation dans la rivière Mississippi. Les valeurs d'*ITS* obtenues à partir des courbes d'autocorrélation varient de 2 à 3 secondes. Cependant, la fréquence d'échantillonnage des séries de vitesses, soit 0.625 Hz, ne permet pas de capter les plus petites fluctuations de vitesse, ce qui met en doute la validité des valeurs d'*ITS* obtenues (Muste *et al.*, 2004a). Nys-



trom (2001), à partir de tests en laboratoire, avait obtenu des résultats et tiré des conclusions similaires.

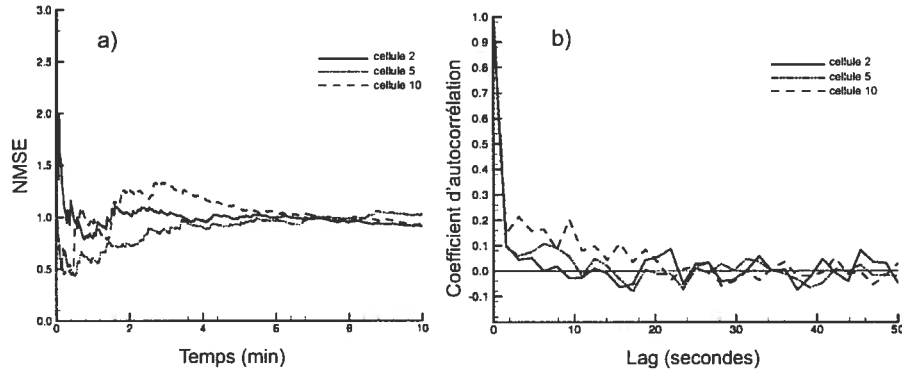


Figure 1.8 – (a) NMSE en fonction de la durée d'échantillonnage (b) Fonction d'autocorrélation pour la vitesse longitudinale à trois profondeurs différentes (Muste *et al.*, 2004a)

Tilston et Biron (sous presse) ont utilisé un PC-ADP dans une boucle de méandre de  $180^\circ$  afin d'investiguer la structure tri-dimensionnelle de l'écoulement et les caractéristiques turbulentes. Leurs travaux incluent une comparaison avec un ADV qui montre les limites du PC-ADP pour les études turbulentes dans les zones de fort gradient de vitesse. En comparaison avec un ADV, le PC-ADP donne de bons estimés de vitesse moyenne dans un écoulement relativement simple (au centre du chenal), mais il est moins efficace dans un plan de mélange où l'écoulement est plus complexe. Une comparaison des différentes méthodes d'estimation des contraintes de cisaillement par l'ADV et un PC-ADP a également été effectuée. La contrainte de cisaillement,  $\tau_0$ , peut être estimée à partir de la vitesse de cisaillement ( $\tau_0 = \rho u_*'^2$ ) calculée avec le profil semi-logarithmique, par la mesure des cisaillements de Reynolds ( $\tau_0 = -\rho \overline{u'w'}$ ), soit en extrapolant le profil linéaire ou en utilisant un seul point de mesure près du lit, ou par la méthode de l'énergie cinétique turbulente (TKE) :

$$\tau_0 = C_1 \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / 2 \quad (1.23)$$

avec  $C_1$ , une constante de proportionnalité ( $\sim 0.19$ ). Leurs résultats indiquent que les méthodes de turbulence de Reynolds et TKE fournissent des estimés de contrainte de cisaillement plus appropriés dans un écoulement complexe. Toutefois, en raison de la grande sensibilité des estimés de cisaillement de Reynolds avec l'alignement des senseurs, ils ont conclu que la méthode TKE était préférable dans un contexte d'écoulement complexe où la direction de l'écoulement est très variable, conformément aux recommandations de Biron *et al.* (2004). De plus, par la comparaison des deux appareils de mesure, ils ont jugé que les estimés de contrainte de cisaillement mesurés par l'ADV étaient plus adéquats que ceux provenant des mesures du PC-ADP, qui effectue un moyennage spatial et temporel trop important.

### 1.3.3 Limites de l'utilisation des ADP

Les sources d'erreurs reliées à la mesure de vitesses par les ADP sont multiples et plusieurs aspects techniques limitent leur utilisation. Le bruit dans les mesures, les problèmes de résolution spatiale et temporelle, le postulat de l'homogénéité de l'écoulement à l'intérieur du volume d'échantillonnage, la présence de la zone tampon en haut de profil ainsi que l'interférence entre les impulsions en bas de profil retiennent ici notre attention. De plus, étant donné le nombre limité d'études en milieu fluvial portant sur la mesure de la turbulence, plusieurs questions méthodologiques subsistent.

#### 1.3.3.1 Bruit dans les mesures

Deux types de bruit affectent la mesure du décalage Doppler, soient les erreurs aléatoires et non-aléatoires. Les erreurs aléatoires sur la mesure constituent ce qui est appelé le bruit Doppler et sont présentes dans chaque mesure individuelle de vitesse à l'intérieur d'une cellule. L'amplitude de ce bruit Doppler dépend du type d'appareil utilisé. Il est plus élevé pour les ADP utilisés en mode incohérent que dans les modes cohérents ou *broad-band*. Il ressemble à du bruit blanc et contamine les fréquences plus élevées du signal.

Les erreurs liées à la mesure du décalage Doppler non aléatoires concernent les pertes de données dues à des pics et les erreurs d'ambiguïté. Les pertes de données dues à des pics sont plutôt rares et peuvent être enlevées grâce à des algorithmes de correction comme celui de Goring et Nikora (2002). Par ailleurs, les erreurs d'ambiguïté sont des mesures de vitesse valides mais décalées d'un facteur de  $V_A$  (voir section 1.3.1.2). Ces erreurs sont résolues à l'aide d'un algorithme qui inclut une mesure de vitesse additionnelle. Cette mesure de vitesse additionnelle, appelée la vitesse de résolution, doit être mesurée pour chaque profil de vitesses. Puisque cette mesure est effectuée à la moitié du profil, le délai entre les impulsions est deux fois plus court que le délai utilisé pour le profil complet. La vitesse maximale mesurée sans ambiguïté pour cette vitesse de résolution est donc deux fois plus élevée que celle du profil de vitesse. La vitesse de résolution est alors exempte d'erreur d'ambiguïté et peut être utilisée comme étant la vitesse réelle de l'écoulement, permettant ainsi de corriger les vitesses du profil. Un algorithme basé sur cette vitesse de résolution permet ainsi de détecter la présence d'erreur d'ambiguïté et de les corriger, en ajoutant ou en soustrayant un facteur de  $V_A$ . Cependant, une mesure de vitesse de résolution de mauvaise qualité ou un mauvais fonctionnement de l'algorithme de traitement peut laisser des erreurs d'ambiguïté ou introduire de nouvelles erreurs dans le signal (Lacy et Sherwood, 2004).

### 1.3.3.2 Résolution spatiale et temporelle

Le deuxième type de limites concerne la résolution spatiale et temporelle des ADP lors de la mesure de la turbulence. Idéalement, une mesure de turbulence résout les plus petites échelles spatiales et temporelles des mouvements dans l'écoulement. La plus petite échelle de l'écoulement, l'échelle de Kolmogorov  $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}$ , est une quantité difficile à estimer puisqu'elle implique la mesure du taux de dissipation d'énergie. Cependant, cette échelle peut être approximée à partir des relations suivantes (Nezu et Nakagawa, 1993) :

$$\eta = \frac{Z}{R_*^{3/4}} \quad (1.24)$$

avec

$$R_* = \frac{Zu_*}{\nu} \quad (1.25)$$

où  $Z$  est la profondeur de l'écoulement,  $u_*$  la vitesse de cisaillement. Généralement, en rivière peu profonde,  $\eta$  est inférieur à un millimètre, ce qui est beaucoup plus petit que le volume d'échantillonnage des profileurs acoustiques à effet Doppler. De plus, les équations 1.24 et 1.25 assument que  $u_*$  est connu, ce qui n'est pas toujours le cas. Cependant, une autre mesure d'échelle microturbulente peut également être utilisée : la longueur de mélange,  $l$ . Celle-ci est obtenue à partir de la profondeur de l'écoulement à partir de la relation  $l = Z/100$  (Nezu et Nakagawa, 1993). Par exemple, dans une rivière de 1 mètre de profondeur,  $l = 1$  cm représente la taille des plus petits tourbillons. L'utilisation d'un ADP ayant des cellules plus grandes qu'un centimètre ne pourra résoudre les plus petites échelles turbulentes de l'écoulement.

De plus, les profileurs acoustiques à effet Doppler n'échantillonnent pas assez rapidement pour capter les plus petites fluctuations de vitesses. Pour un ADP qui échantillonne à une fréquence de 1 Hz dans un écoulement de  $50 \text{ cm s}^{-1}$  à 30 cm au dessus du lit, 60% de l'énergie ne sera pas captée par l'appareil dans les fluctuations de  $w'$  et 20% pour la composante  $u'$  (Soulsby, 1980). Ces pourcentages d'énergie perdue augmentent pour des mesures plus près du lit et diminuent vers la surface. La taille du volume d'échantillonnage limite également la fréquence maximale qui peut être captée par l'émetteur (voir équation 1.14). Cependant, la fréquence d'échantillonnage des profileurs (1-2 Hz) est généralement plus basse que la fréquence maximale captée dans un volume de la taille des cellules. Le temps de traitement des données de vitesse recueillies par les ADP est ce qui limite la fréquence d'échantillonnage.

La fréquence d'échantillonnage n'est pas suffisamment élevée et le volume d'échantillonnage est trop grand pour permettre de résoudre les plus petites structures de l'écoulement (Soulsby, 1980). Une fréquence d'échantillonnage trop faible et une homogénéisation spatiale à l'intérieur du volume d'échantillonnage limitent sérieusement l'estimation de statistiques turbulentes de l'écoulement comme les spectres dans les hautes fréquences, les autocorrélations et l'*ITS* (Nystrom *et al.*, 2002). La perte de variations turbulentes dans les hautes fréquences avec les ADP, combinée au problème de moyennage spatial, implique qu'il ne s'agit vraisemblablement pas d'un instrument approprié pour l'études de structures turbulentes de petite taille (Tilston et Biron, sous presse). Cependant, même si l'ADP ne peut pas résoudre les plus petites structures turbulentes, l'intensité turbulente peut être estimée à partir des grandes structures puisqu'elles contiennent la majeure partie de l'énergie (Gargett, 1994). Cette approche est celle adoptée pour la mesure de la turbulence dans les océans et estuaires.

### 1.3.3.3 Homogénéité de l'écoulement et changement de coordonnées

Le postulat de l'homogénéité de l'écoulement dans les cellules de mesures pour assurer la validité du changement de coordonnées à partir des vitesses mesurées parallèlement aux faisceaux (vitesses radiales) vers les composantes longitudinales, latérales et verticales de l'écoulement est crucial. Comme les faisceaux divergent, la distance entre ceux-ci s'élargit lorsqu'ils s'éloignent de l'émetteur, agrandissant le volume dans lequel l'écoulement doit être homogène. Un écoulement est dit homogène lorsque les trois composantes cartésiennes de la vitesse,  $u$ ,  $v$  et  $w$ , sont exactement les mêmes pour chacun des faisceaux. Or, plus les cellules sont loin de l'émetteur, plus la validité du postulat de l'homogénéité de l'écoulement à l'intérieur du volume d'échantillonnage est problématique. La figure 1.9 illustre l'effet d'un écoulement non homogène sur la qualité des vitesses après le changement de coordonnées à partir d'un ADP simplifié à 2 faisceaux. Dans le cas où l'écoulement n'est pas homogène (figure 1.9a), la direction réelle de l'écoulement n'est pas la même pour les deux faisceaux. Cependant, après le changement de coordonnées,

l'ADP interprétera ces vitesses comme étant un écoulement dirigé horizontalement. L'appareil ne peut pas faire la différence entre l'écoulement de la figure 1.9a et 1.9b à cause du changement de coordonnées. Le changement de coordonnées dans un écoulement non homogène a donc comme conséquence d'introduire des erreurs dans les vitesses cartésiennes.

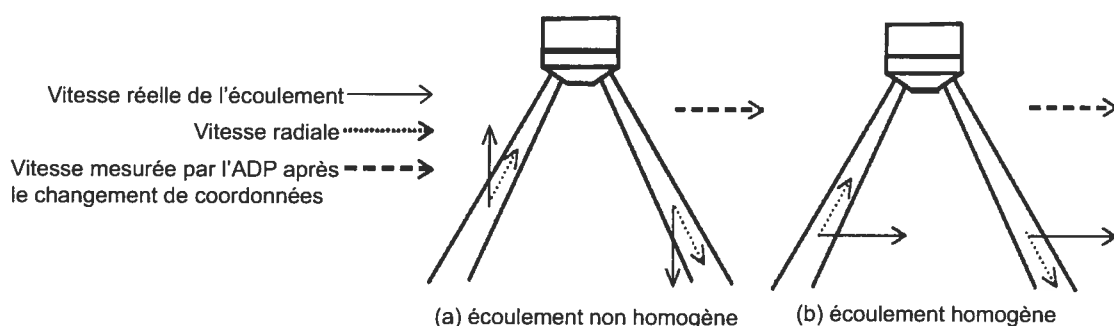


Figure 1.9 – Effet du changement de coordonnées de l'ADP dans un écoulement homogène et non homogène (Nystrom *et al.*, 2002). Pour les deux cas, la vitesse mesurée par l'ADP après le changement de coordonnées est la même. Cependant, dans l'écoulement inhomogène en a) la vitesse mesurée ne correspond pas à la vitesse réelle de l'écoulement. Les mouvements verticaux, vers le haut pour un faisceau et vers le bas pour l'autre, ne peuvent être détectés par l'appareil et seront interprétés par celui-ci comme un écoulement dirigé horizontalement identique à celui en b).

Pour remédier à ce problème, Gargett (1994) a ajouté un faisceau à un ADP afin de mesurer directement la vitesse verticale. Ainsi, sachant la vitesse verticale réelle de l'écoulement, les vitesses obtenues par le changement de coordonnées peuvent être corrigées. Nystrom *et al.* (2002) a comparé en laboratoire deux ADP cohérents, un ayant trois faisceaux et l'autre quatre. Ils ont évalué que le changement de coordonnées dans un écoulement inhomogène a pour effet d'augmenter l'écart-type de la vitesse longitudinale de  $3.39 \text{ cms}^{-1}$  pour l'ADP à trois faisceaux. Quant à la vitesse verticale, le changement de coordonnées diminue les fluctuations de vitesse et réduit l'écart-type de  $1.49 \text{ cms}^{-1}$ . Pour l'ADP à quatre faisceaux, le changement de coordonnées réduit l'écart-type pour ces deux composantes de vi-

tesses. En utilisant un ADP à quatre faisceaux, Lohrmann *et al.* (1990) ont montré que les deux composantes des cisaillements de Reynolds alignés avec les paires de faisceaux ne sont pas affectées par l'inhomogénéité de l'écoulement (voir section 1.3.2.1). Leur technique utilise directement la variance des faisceaux et assument que seules les propriétés moyennes de l'écoulement doivent être homogènes. Leur conclusion est confirmée par les tests en laboratoire de Nystrom *et al.* (2002), qui ont démontré que la configuration à quatre faisceaux donne de bonnes estimations des cisaillements de Reynolds, contrairement à l'ADP à trois faisceaux.

Dans un écoulement turbulent, l'existence de structures à des échelles comparables ou plus petites que la distance entre les faisceaux invalident l'hypothèse d'homogénéité à l'intérieur du volume sondé. Lu et Lueck (1999a) ont cependant présumé que les propriétés statistiques de l'écoulement sont horizontalement homogènes si la durée de l'échantillonnage inclut un grand nombre de ces structures. La durée d'échantillonnage doit alors être supérieure à  $d/\bar{u}$ ,  $d$  étant la distance entre les faisceaux. Ils ont estimé qu'une durée d'échantillonnage de 20 minutes est nécessaire afin de séparer les fluctuations de vitesses de la moyenne lorsque le profileur échantillonne à une fréquence de 1.3 Hz. Ce temps, qui correspond à une longueur de 55 fois la distance entre les faisceaux, leur permet d'assumer que les propriétés statistiques sont homogènes à l'intérieur du volume d'échantillonnage et d'obtenir une estimation raisonnable de cisaillement et d'énergie cinétique turbulente (Lu et Lueck, 1999a).

Kawanisi (2004) a observé qu'un ADP cohérent à 3 faisceaux sous-estimait les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente de 20% par rapport aux valeurs estimées à partir de mesures d'ADV échantillonnées à 25 Hz. Il suggère que cette sous-estimation est causée davantage par la faible résolution temporelle que par l'inhomogénéité dans le volume d'échantillonnage. Même si la magnitude des estimations des cisaillements de Reynolds et de l'énergie cinétique n'est pas exacte, Kawanisi (2004) utilise les variations temporelles de ces quantités ainsi que le ratio  $\frac{\overline{u'w'}}{q^2}$  dans son étude.

Le postulat de l'homogénéité de l'écoulement à l'intérieur du volume d'échan-

tillonnage est particulièrement important lorsque le gradient de vitesse est grand, comme dans le méandre étudié par Tilston et Biron (sous presse). La comparaison des mesures du PC-ADP avec l'ADV a également révélé que les problèmes de moyennage spatial et temporel du PC-ADP nuisaient grandement aux mesures de contrainte de cisaillement dans les écoulements en présence d'un plan de mélange. L'estimation de la contrainte de cisaillement par la méthode des profils semi-logarithmiques est souvent difficile puisque les profils de vitesse moyenne dans les écoulements complexes ne sont pas toujours logarithmiques et que le manque de données dans le premier 20% au-dessus du lit augmente grandement l'erreur sur la valeur ainsi obtenue (Biron *et al.*, 1998). Les travaux de Biron *et al.* (2004) ont révélé que les meilleurs estimés de contrainte de cisaillement sont obtenus par des méthodes de turbulence (Reynolds et TKE) mais que la méthode TKE (équation 1.23) est préférable dans un contexte d'écoulement complexe où la direction d'écoulement est très variable. Cependant, la méthode TKE utilise  $C_1$ , une constante de proportionnalité entre les valeurs d'énergie cinétique turbulente et de cisaillement de Reynolds, qui a été proposée dans un contexte océanographique. La valeur de cette constante qui varie avec la hauteur au-dessus du lit a peut-être besoin d'être ré-évaluée dans un environnement fluvial (Biron *et al.*, 2004), avant d'être utilisée pour estimer la contrainte de cisaillement. La méthode d'estimation de la contrainte de cisaillement par la mesure des cisaillements de Reynolds a également ses limites, puisque le profil linéaire attendu n'est généralement pas observé. En effet, la valeur maximale de cisaillements de Reynolds n'est pas atteinte près du lit mais à une hauteur qui correspond approximativement à 10% de la profondeur (Biron *et al.*, 2004). Cette valeur maximale doit être alors utilisée afin d'estimer la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement ( $u^* = \sqrt{-u'w'}$ ).

#### 1.3.3.4 Zone tampon et interférence entre les impulsions

Les mesures en rivière peu profonde sont désormais possibles compte tenu de la meilleure résolution spatiale des nouveaux types d'ADP en mode cohérent. Cependant, des contraintes techniques limitent le nombre de cellules que l'on peut



mesurer à l'intérieur d'un profil. La présence de la zone tampon en haut du profil et les pertes en bas de profil près du lit limitent la proportion de la tranche d'eau que peut mesurer l'appareil.

Aucune mesure ne peut être effectuée à l'intérieur de la zone tampon près des émetteurs-récepteurs de l'ADP. La présence de cette zone tampon est causée par le temps de réponse des émetteurs-récepteurs. Puisque les impulsions sont émises et captées par la même composante, les mesures de vitesses trop près de l'appareil, là où les impulsions reviendraient trop vite vers l'appareil, ne laissent pas suffisamment de temps entre l'émission et la réception des impulsions. Cette zone qui est généralement de 0.05 à 0.20 mètres pour les PC-ADP (SonTek, 2004) limite les mesures en milieu peu profond. Des appareils ayant une configuration qui minimise la taille de la zone tampon ont été développés (RD Instruments) pour l'utilisation en rivière peu profonde. Cependant, même si la distance de la zone tampon est réduite, les cellules dans le haut du profil sont affectées par la présence de l'appareil qui modifie l'écoulement autour de lui (Gartner et Ganju, 2002). De plus, les premières cellules du profil obtenu comportent généralement une forte proportion de bruit (Lacy et Sherwood, 2004) parce qu'elles sont affectées par l'effet de *near-field acoustic* (Zedel *et al.*, 1996) qui diminue la corrélation du signal dans les premiers 30 centimètres du profil.

La mesure de vitesse près du lit avec un profileur à effet Doppler déployé à la surface de l'écoulement est également problématique. Les vitesses mesurées dans les cellules près du lit sont contaminées par deux phénomènes : l'interférence *side-lobe* et l'interférence entre les impulsions acoustiques. L'interférence *side-lobe* s'explique par le fait que les ADP utilisent des faisceaux acoustiques focalisés à l'intérieur d'un cône d'ouverture de 1 à deux degrés, mais qui contiennent également de l'énergie acoustique plus faible qui se propagent à l'extérieur de ce cône. Puisque la direction des faisceaux est à un angle de 15 à 25°, l'énergie acoustique qui se propage à l'extérieur du faisceau sera réfléchiée par le lit et se verra retourner à l'appareil en même temps que les impulsions focalisées du faisceau. La vitesse mesurée alors par l'appareil sera un mélange de la vitesse dans la cellule près du lit (mesurée

par les impulsions focalisées) et de la vitesse du lit, souvent nulle (mesurée par les impulsions à l'extérieur du faisceau). La distance de l'effet de ce phénomène dépend donc de l'angle que font les faisceaux par rapport à la verticale. Plus cet angle est grand, plus la distance affectée par l'interférence *side-lobe* sera grande. Par exemple, ce phénomène affectera une proportion de 9% du profil lorsque les faisceaux sont inclinés de  $25^\circ$  et de 6% pour une inclinaison de  $20^\circ$  (Nystrom, 2001).

L'interférence entre les impulsions, quant à elle, affecte seulement les profileurs cohérents, où peu de temps sépare les paires d'impulsion. Ce second type d'interférence se produit lorsque de l'énergie acoustique de la première impulsion (habituellement après avoir été réfléchi par le lit) se trouve encore dans la cellule lorsque la seconde impulsion arrive. La mesure dans cette cellule aura alors une corrélation très faible. Pour réduire les chances de provoquer ce type d'interférence, un délai plus long entre les impulsions peut être utilisé (SonTek, 2004). L'interférence entre les impulsions sera également discutée plus loin dans la section 2.5.1.1.

### 1.3.3.5 Manque de références en milieu fluvial

La majorité des études qui mesurent les paramètres turbulents de l'écoulement ont été effectuées en océan, estuaire ou en milieu côtier. À ma connaissance, seulement quatre études ont quantifié la turbulence en rivière. De ces études, une seule a exploité le potentiel tridimensionnel de l'ADP et a tenté d'évaluer le cisaillement de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente (Tilston et Biron, sous presse). La mesure de la turbulence en rivière à l'aide de la technologie ADP n'est donc pas aussi développée que celle qui s'effectue dans les milieux marins. Le développement de méthodologies pour quantifier les diverses échelles de l'écoulement turbulent en rivière et pour ajuster les paramètres d'échantillonnage devient donc un aspect de l'utilisation des ADP que l'on doit explorer (Muste *et al.*, 2004a). C'est ici que s'inscrit ce mémoire.

## 1.4 Vélocimètres acoustiques à effet Doppler

Les vélocimètres à effet Doppler, ADV, ont la capacité de mesurer des vitesses en trois dimensions sans interférence avec l'écoulement à haute fréquence d'échantillonnage dans un très petit volume. Le vélocimètre à effet Doppler utilise la même méthode de mesure que le PC-ADP mais possède une géométrie différente. Les récepteurs sont placés à  $120^\circ$  les uns des autres autour de l'émetteur (géométrie bistatique), contrairement au PC-ADP où les émetteurs servent également de récepteurs (géométrie monostatique). Les récepteurs de l'ADV sont inclinés de  $30^\circ$  par rapport à l'axe de l'émetteur et le volume d'échantillonnage se trouve à environ 10 cm directement sous l'émetteur (voir Figure 1.10).

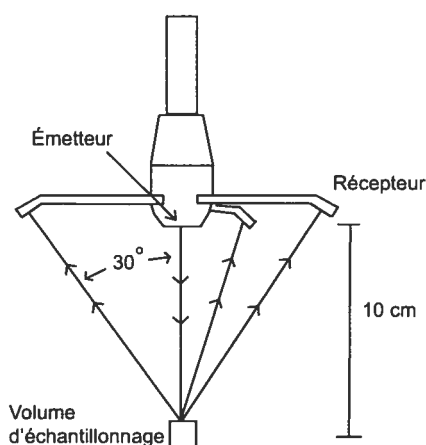


Figure 1.10 – Schéma d'un ADV, modifié de Voulgaris et Trowbridge (1998)

La taille du volume d'échantillonnage est fonction de la longueur des impulsions et de la géométrie des faisceaux émis et reçus. La dimension latérale, calculée en utilisant le diamètre de l'émetteur ( $6\text{mm}$ ) et la largeur angulaire des faisceaux ( $1.4^\circ$ ), est de  $6.53\text{mm}$  (Voulgaris et Trowbridge, 1998). L'échelle verticale du volume d'échantillonnage, reliée à la longueur des impulsions, correspond à environ  $9\text{mm}$ . Le volume d'échantillonnage a donc la forme d'un cylindre de  $300\text{ mm}^3$ . L'ADV émet 100 impulsions acoustiques par seconde, mais utilise la moyenne de quatre mesures pour produire une fréquence d'échantillonnage de 25 Hz.

L'ADV échantillonne donc beaucoup plus vite que le PC-ADP, ce qui lui permet d'avoir un pourcentage de corrélation plus élevé entre les impulsions acoustiques. Puisque le volume d'échantillonnage de l'ADV est situé à environ 10 cm de l'émetteur, il utilise des délais plus courts entre les impulsions que ceux généralement utilisés par le PC-ADP. Ces délais entre les impulsions plus courts augmentent la vitesse qui peut être mesurée sans ambiguïté. Également, la géométrie convergente lui permet de mesurer les vitesses radiales de chaque faisceau dans le même volume d'échantillonnage. Le changement de coordonnées des vitesses radiales en vitesses cartésiennes est donc toujours valide.

L'ADV est largement utilisé en laboratoire et sur le terrain dans les milieux fluviaux (e.g. Lane *et al.*, 1998; Nikora et Goring, 2000; Nicholas, 2001). Plusieurs études ont rapporté la présence de bruit qui contamine les hautes fréquences du signal (Voulgaris et Trowbridge, 1998; Goring et Nikora, 2002). Ils ont également été utilisés en laboratoire (Nystrom, 2001), en milieu océanique (e.g. Lacy et Sherwood, 2004; Kawanisi, 2004; Souza et Howarth, 2005) et en rivière (Tilston et Biron, sous presse) à titre d'instruments de référence lors de l'évaluation des profileurs acoustiques à effet Doppler dans les écoulements turbulents.

## CHAPITRE 2

### PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODES

#### 2.1 Problématique et objectifs

L'obtention d'information spatiale à partir de mesures de vitesses ponctuelles demande beaucoup de ressources, d'appareils et de temps. Les profileurs à effet Doppler peuvent mesurer des profils de vitesses instantanés dans les trois dimensions de l'écoulement et peuvent mesurer la turbulence comme en témoignent plusieurs études en océanographie. Les nouveaux profileurs *pulse coherent* (PC-ADP) ont l'avantage d'avoir une résolution spatiale fine et peuvent donc être utilisés en rivière peu profonde.

Cependant, plusieurs contraintes techniques, tel le bruit présent dans les mesures, le relativement grand volume échantillonné à l'intérieur des cellules et l'élargissement des faisceaux avec la profondeur peuvent limiter son application dans les environnements fluviaux. Les erreurs d'ambiguïté dans les mesures de vitesse limitent la vitesse maximale que l'on peut mesurer. La fréquence maximale d'échantillonnage est beaucoup plus faible que celle de plusieurs sondes ponctuelles comme les ADV ou les courantomètres électromagnétiques. La zone tampon et les réflexions qui décorrélent les signaux près du lit restreignent la proportion de la tranche d'eau mesurée en rivière peu profonde. Des comparaisons entre le PC-ADP et une sonde ponctuelle, un vélocimètre à effet Doppler, ont été effectuées en laboratoire (Nystrom, 2001) et en milieu océanique (Lacy et Sherwood, 2004; Kawanisi, 2004; Souza et Howarth, 2005) mais une seule a été réalisée en rivière (Tilston et Biron, sous presse). Le développement d'une méthode pour quantifier les différentes échelles turbulentes en rivières et pour choisir des paramètres d'échantillonnage est donc nécessaire. Des études sur l'influence du volume et de la fréquence d'échantillonnage sur les mesures de PC-ADP sont encore à réaliser en rivière (Muste *et al.*, 2004a).

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel du PC-ADP pour mesurer la turbulence en rivière peu profonde. Dans un premier temps, les données obtenues avec un PC-ADP seront comparées à des mesures ponctuelles recueillies avec un ADV. Ceci permettra d'évaluer les effets du plus grand volume d'échantillonnage, du bruit Doppler et de l'élargissement des faisceaux. Un algorithme de détection et de résolution des erreurs d'ambiguïté sera développé et testé en utilisant des mesures ponctuelles afin d'augmenter la vitesse maximale pouvant être mesurée avec l'appareil. Dans un deuxième temps, le potentiel du PC-ADP à quantifier la turbulence sera évalué dans plusieurs environnements fluviaux différents.

La comparaison entre le profileur et le vélocimètre à effet Doppler s'effectuera dans une rivière à lit sablonneux, facilitant ainsi le déploiement des appareils. Nous comparerons les mesures de PC-ADP avec celle de l'ADV dans trois emplacements où les profondeurs et vitesses de l'écoulement et la rugosité du lit diffèrent. Les vitesses moyennes et plusieurs statistiques turbulentes seront comparées pour plusieurs points de mesure dans la tranche d'eau.

Pour évaluer la capacité du PC-ADP à mesurer la turbulence dans divers environnements fluviaux, nous avons déployé l'appareil à plusieurs emplacements de trois rivières différentes. Nous avons tenté d'utiliser une gamme de milieux montrant des différences de substrat, de profondeur, de vitesse moyenne et de rugosité. Les profils des paramètres turbulents seront réalisés. Nous tenterons de déterminer dans quelle mesure le PC-ADP peut capter les caractéristiques turbulentes de l'écoulement et d'évaluer les limites de l'appareil.

## 2.2 Sites d'étude

Le premier site d'étude choisi pour la comparaison des deux appareils est la Rivière Rouge en amont de La Conception à quelques 150 km au nord-ouest de Montréal au Québec (figure 2.1). La rivière est d'une largeur moyenne de 100 m et d'une profondeur moyenne de 2.5 à 3 m au niveau plein bord. Le lit est sablonneux avec un  $D_{50}$  variant de 230 à 320  $\mu\text{m}$  soit du sable grossier. Le site est idéal pour

l'utilisation du PC-ADP puisque l'eau, tout en étant relativement claire, contient un nombre suffisant de particules en suspension pour réfléchir le signal acoustique. De plus, dans la section choisie, on retrouve une grande variabilité de conditions hydrauliques ce qui se traduit par une gamme de profondeurs, de vitesses moyennes et de rugosité du lit.

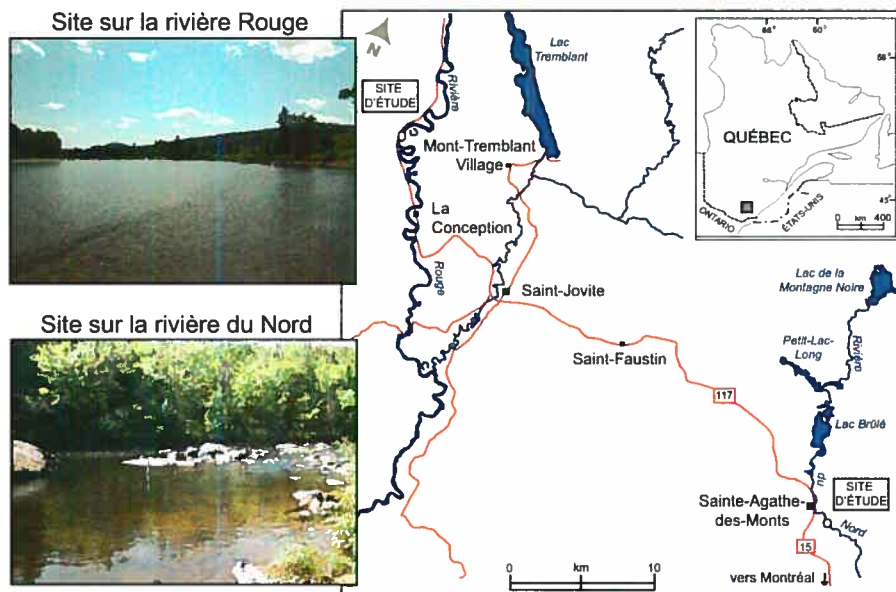


Figure 2.1 – Localisation des sites d'étude sur la rivière Rouge et sur la rivière du Nord

Également situé dans les Laurentides, le deuxième site choisi est la rivière du Nord à Sainte-Agathe-des-Monts (figure 2.1). Le substrat à la surface du lit est composé de blocs de plus de 1 mètre de diamètre et de sable et de gravier dans les interstices. La section choisie est située au début d'une mouille d'une largeur de 30 mètres.

Le troisième site est sur une rivière à lit graveleux, la rivière Eaton-Nord, en Estrie (figure 2.2). Cette rivière à lit de gravier se caractérise par la présence de séquences seuil-mouille bien définies. La section d'étude est dans une mouille profonde liée à l'affleurement de la roche en place sur une des deux rives. L'écoulement dans la mouille a un nombre de Reynolds variant de 95 000 à 196 000 comparative-ment à 250 000 et 525 000 pour le seuil à l'aval. Le substrat de la surface du lit est



composé de gravier et sable. La distribution de l'axe intermédiaire des particules dans la mouille a un  $D_{50}$  de 2.3 mm et sur le seuil, un  $D_{50}$  de 19 mm.

Nous décrirons maintenant les détails techniques des deux appareils utilisés. Le profileur (PC-ADP) et le vélocimètre (ADV) à effet Doppler utilisent tous deux la même technologie cohérente.

Le profileur à effet Doppler utilisé dans cette étude est le PC-ADP 1.5 Mhz de Sontek. La tête de l'instrument logeant les émetteurs-récepteurs est relativement petite (diamètre de 10 *cm* et hauteur de 23 *cm*) ce qui restreint la modification de l'écoulement autour de la sonde. Les trois faisceaux font un angle de 15 degrés avec la verticale, ce qui limite l'élargissement des faisceaux et l'interférence *side-lobe* qui n'affecte que 3% à la base du profil. La distance entre les faisceaux,  $d$ , est fonction de la distance par rapport à l'instrument,  $D$  :  $d = 2D \tan(15^\circ)$ . L'étendue maximale



du profil est de 3 mètres, la taille minimale des cellules est de 2 cm et la zone tampon minimale est de 5 cm. Le PC-ADP mesure les vitesses en trois dimensions à une fréquence maximale de 2 Hz. Dans la plupart des cas, nous avons mesuré des profils composés de 6 à 10 cellules à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz. Cette configuration a semblé optimale en fonction des conditions de l'écoulement.



Figure 2.3 – PC-ADP (SonTek)

Les données sont recueillies et visualisées à l'aide des logiciels fournis par SonTek (*SonUtils*, *CurrentMonitor* et *ViewADP*) mais exportés en fichiers ASCII afin d'être analysés à l'aide de programmes développés dans *Matlab*.

### 2.3.2 ADV

Le vélocimètre utilisé est celui de SonTek, utilisant des ondes acoustiques de 10 MHz. Tout comme le PC-ADP, l'ADV mesure la vitesse de l'écoulement en trois dimensions mais avec une résolution temporelle élevée. La fréquence d'échantillonnage maximale est de 25 Hz. Il échantillonne dans un volume de  $300 \text{ mm}^3$  à une distance de 10 cm de l'émetteur et des récepteurs, évitant ainsi une perturbation de l'écoulement dans le volume de mesure.



Figure 2.4 – ADV (SonTek)

## 2.4 Protocole expérimental

Les protocoles expérimentaux diffèrent pour les deux parties de l'étude. La première partie se déroule dans un environnement sablonneux et fait intervenir le PC-ADP et l'ADV et la deuxième partie se fonde uniquement sur des mesures de PC-ADP dans les trois rivières différentes.

### 2.4.1 Comparaison ADV et PC-ADP

Pour cette première partie de l'étude, le PC-ADP et l'ADV ont été déployés de la même façon. Un tuyau métallique de 175 cm de longueur enfoncé dans le lit sablonneux et surmonté d'une potence d'aluminium de 50 cm de long a servi de support. Les appareils sont reliés à leurs processeurs, ordinateurs portables et batteries situés sur un bateau pneumatique à quelques mètres en aval du lieu de mesure. Ceci évite de modifier l'écoulement dans la section d'échantillonnage (Figure 2.5). Le PC-ADP étant doté d'un niveau interne, la position de l'appareil peut être ajustée de façon à ce que les angles que font l'appareil par rapport à la verticale, *pitch* et *roll*, soient le plus près de zéro possible. Pour tous les déploiements, ces angles sont inférieurs à  $3^\circ$ .

Deux types de comparaison ont été réalisés (Figure 2.6). Le premier type repose sur des mesures où le volume d'échantillonnage de l'ADV est placé le plus près pos-



Figure 2.5 – Protocole expérimental dans la rivière Rouge pour la comparaison entre le PC-ADP et l'ADV. a) Les instruments sont connectés aux batteries et aux ordinateurs qui sont sur le bateau gonflable. b) Les deux instruments sont installés pour que l'ADV se retrouve en aval du PC-ADP

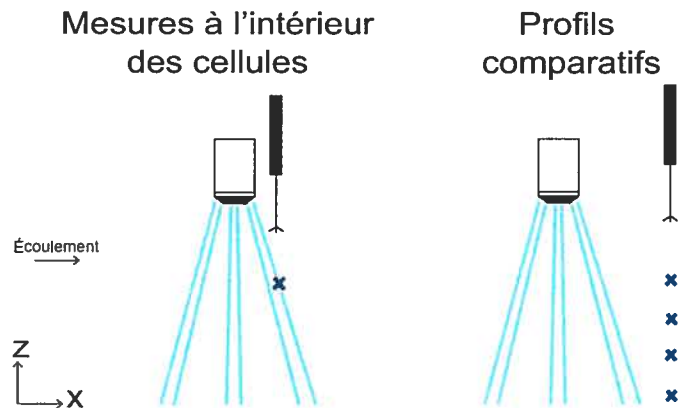


Figure 2.6 – Schéma explicatif des deux types de mesures pour fin de comparaison

sible d'une cellule du faisceau 1 du PC-ADP. Le volume d'échantillonnage de l'ADV est à la profondeur et à la distance du PC-ADP qui correspond au volume d'échantillonnage de la cellule visée. L'ADV sera placé pour échantillonner successivement à l'intérieur de la deuxième, quatrième, sixième et huitième cellule du profil. Pour les profils comparatifs, l'ADV est situé à une distance fixe du PC-ADP (30 cm) et plusieurs mesures sont effectuées à différentes profondeurs correspondant aux cellules 2, 4, 6 et 8. Les deux types de mesures ont été effectués à quatre différents emplacements de la rivière (tableau 2.1).

Date	Z (cm)	$\bar{u}$ ( $\text{cms}^{-1}$ )	Type de mesure	NC	TC (cm)
13-07-2005	100	30	Faisceau	10	9
20-07-2005	85	45	Faisceau, profils	10	8
21-07-2005	95	28	Profils	10	8
25-07-2005	97	70	Faisceau, profils	10	8

Tableau 2.1 – Sommaire des mesures pour la comparaison entre le PC-ADP et l'ADV sur les différents sites de la rivière Rouge.  $\bar{u}$  est la vitesse moyenne de l'écoulement, Z, la profondeur d'eau sous l'appareil, NC et TC, le nombre et la taille des cellules du profil.

Les mesures d'ADV effectuées à l'intérieur du faisceau 1 du PC-ADP permettent la comparaison des vitesses radiales, parallèles au faisceau. Cette méthode de comparaison est la plus directe pour évaluer la capacité du PC-ADP à mesurer les fluctuations de vitesses parallèles au faisceau (Nystrom, 2001) et elle sera utilisée pour tester un algorithme de résolution des ambiguïtés. Les profils de vitesses seront utilisés pour comparer les valeurs caractéristiques de vitesses moyennes, de l'intensité turbulente, des cisaillements de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente à partir des vitesses remises en coordonnées cartésiennes.

Les séries temporelles de vitesses ont été recueillies pour une durée de 25 à 30 minutes. L'influence de la durée de l'échantillonnage sur l'estimation des statistiques turbulentes sera examinée afin de déterminer une durée adéquate pour l'analyse.

#### 2.4.2 Déploiements du PC-ADP dans les différents environnements fluviaux

Pour réaliser le deuxième objectif de l'étude, le déploiement du PC-ADP dépend de la composition du lit de la rivière. Dans la rivière Rouge, au lit sablonneux, le PC-ADP a été déployé selon le même protocole décrit plus tôt, l'ADV en moins. Dans le cas des rivières à lit graveleux soit la rivière du Nord et Eaton-Nord, le tuyau métallique ne pouvait être enfoncé de façon à maintenir une position verticale stable. Nous avons donc utilisé un trépied pour fixer l'appareil. Un niveau sur le trépied ainsi que le niveau interne du PC-ADP ont permis de fixer l'appareil à des

angles *pitch* et *roll* plus petits que  $2^\circ$ .

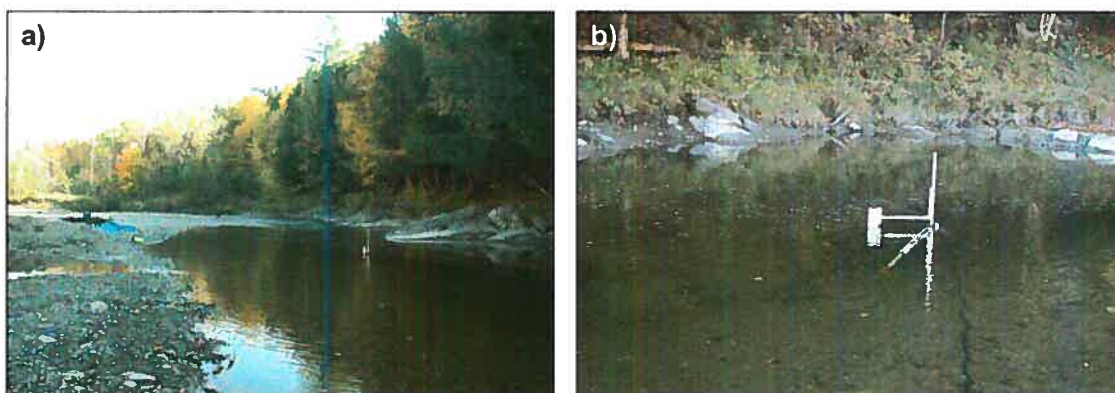


Figure 2.7 – Protocole expérimental dans la rivière Eaton. a) Les instruments sont connectés aux batteries et aux ordinateurs qui sont sur la berge. b) Le PC-ADP est fixé à l'aide d'un trépied. Le même protocole a été utilisé dans la rivière du Nord.

Des relevés topographiques ont été effectués sur les rivières Rouge et Eaton-Nord afin de situer les mesures. Pour la rivière Rouge, étant donné que la zone utilisée couvrait plus d'une centaine de mètres de longueur et de largeur, la carte topographique est incomplète.

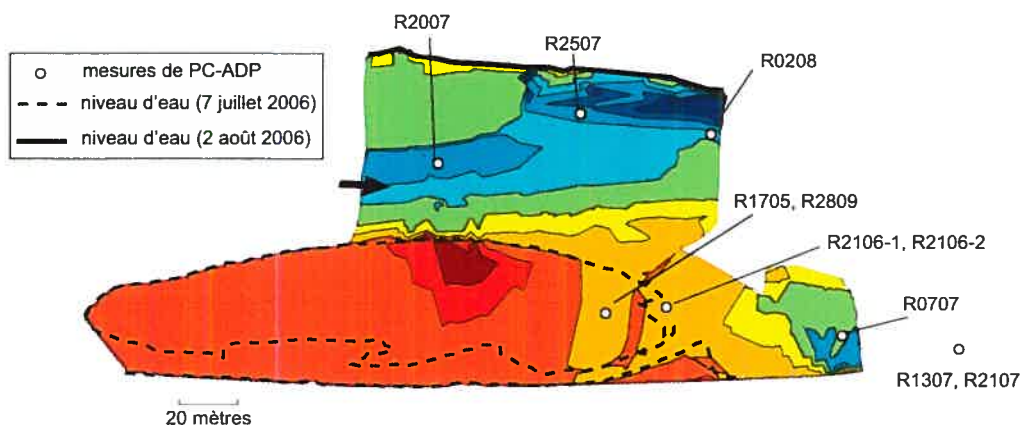


Figure 2.8 – Sites d'étude sur la rivière Rouge. La flèche représente la direction de l'écoulement.

De plus, lorsque le niveau d'eau était élevé, plusieurs sections de la rivière Rouge étaient inaccessibles. Les lignes noires sur la carte représentent les berges au plus bas niveau d'eau (vers la fin juillet, début août). À des niveaux d'eau plus hauts,



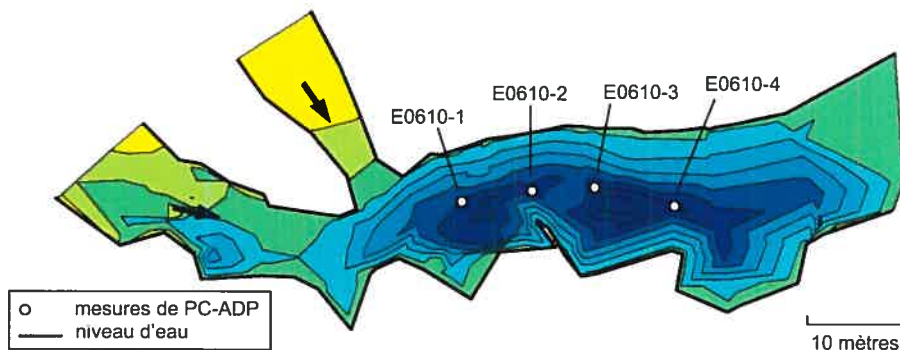


Figure 2.9 – Sites de mesures sur la rivière Eaton-Nord. Les flèches représentent la direction de l'écoulement.

le banc de sable est complètement submergé (17 mai et 28 septembre). Les points où les mesures ont été recueillies le 13 et 21 juillet ne sont pas représentés sur la carte, étant situés à l'aval de la zone cartographiée. Pour la rivière Eaton-Nord, les points de mesures ont été effectuées la même journée à quatre endroits situés de l'amont vers l'aval de la mouille. La ligne noire représente le niveau d'eau lors de cette journée.

Nous n'avons pas effectué de relevé topographique dans la rivière du Nord qui était plus difficile d'accès et qui comportait une très forte rugosité due aux blocs métriques. Le seul site de mesure se situait à l'entrée d'une mouille (figure 2.10).



Figure 2.10 – Site sur la rivière du Nord.

Les sites sont numérotés de la manière suivante :  $rrjjmm - n$ . La première lettre,  $r$ , représente la rivière (R pour Rouge, N pour du Nord et E pour Eaton-Nord),  $jj$  et  $mm$  indiquent le jour et le mois de la cueillette des profils. Lorsque que plus d'un profil a été effectué le même jour à des sites différents, ils seront numérotés avec le suffixe dans l'ordre de la cueillette  $-n$ . Les environnements ont été choisis de façon à couvrir un large spectre de types d'écoulement, de rugosités et de morphologies du lit. Les conditions du lit couvrent des lits sablonneux avec rides et dunes, dont certaines en mouvement et de lits graveleux dans des mouilles de différentes rugosités. Les conditions d'écoulement sont aussi très diverses, allant de l'écoulement uniforme, à des zones de séparation derrière un banc d'accumulation et derrière un large bloc, en passant par une transition de décélération et d'accélération du fluide dans une mouille. La figure 2.11 illustre la gamme couverte par les différents sites selon un gradient de complexité de l'écoulement et de la résistance du lit.

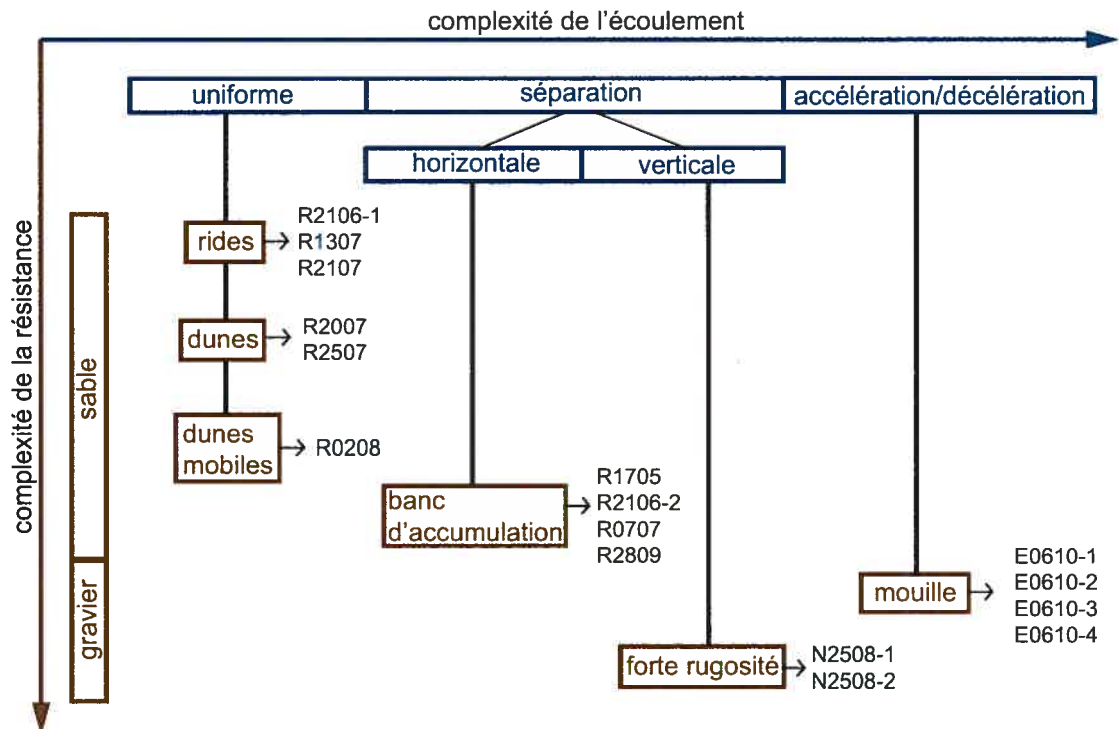


Figure 2.11 – Classification des sites de mesures de PC-ADP.

Le tableau 4.1 présente les caractéristiques des 14 environnements fluviaux différents situés sur les trois rivières. La profondeur de l'écoulement, la moyenne et l'écart-type (ou intensité turbulente) de la vitesse et la vitesse de cisaillement estimée par la loi du mur sont décrits pour chaque site. Les séries temporelles ont été recueillies pour des durées de 23 à 60 minutes à une fréquence variant entre 1 et 2 Hz selon les cas.

Écoulement	Résistance	Site	Z	$\bar{u}$	$u_{int}$	$u_L^*$
Uniforme	Rides	R2106-1	70	32	5	2.8
		R1307	107	32	3	2.3
		R2107	95	28	3	0.9†
	Dunes	R2007	85	45	3	4
		R2507	97	70	7	5
		R0208	30	60	13	n/d
	Dunes mobiles	R0208	30	60	13	n/d
Séparation horizontale	Banc d'accumulation	R1705	92	15	n/d	n/d
		R2106-2	80	6	n/d	n/d
		R0707	72	5	n/d	n/d
		R2809	60	7	n/d	n/d
Accélération/ décélération	Mouille	E0610-1	80	10	7	n/d
		E0610-2	93	20	8	6
		E0610-3	97	20	7	3
		E0610-4	98	20	7	2.9
Séparation verticale	Forte rugosité	N2508-1	65	10	8	4
		N2508-2	65	10	8	4

Tableau 2.2 – Mesures de PC-ADP dans les différents milieux fluviaux. Z est la profondeur d'eau sous l'appareil (en cm),  $\bar{u}$  est la vitesse moyenne de l'écoulement (en  $\text{cm s}^{-1}$ ),  $u_{int}$ , l'intensité turbulente (en  $\text{cm s}^{-1}$ ) et  $u_L^*$  la vitesse de cisaillement (en  $\text{cm s}^{-1}$ ). † : valeurs obtenues à partir de vitesses de mauvaise qualité. n/d : données non disponibles.



## 2.5 Traitement des données

Plusieurs traitements ont été pratiqués sur les données recueillies sur le terrain. Certains avaient pour but de vérifier l'intégrité des données alors que d'autres visaient à extraire de l'information sur les séries de vitesse mesurées par les deux appareils. Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide du progiciel *Matlab*.

### 2.5.1 Intégrité des données

Cet exercice a pour but de s'assurer de la qualité des données, c'est-à-dire qu'elles sont bonnes, non contaminées et qu'elles représentent les conditions du fluide étudié. Pour ce faire, nous avons soumis les données à deux tests.

#### 2.5.1.1 Examen visuel des données

La première étape consiste à examiner visuellement les séries temporelles de vitesses. De plus, pour les deux instruments et pour chaque mesure de vitesses, deux paramètres de contrôle de qualité sont mesurés : le rapport signal-à-bruit (*SNR*) et le pourcentage de corrélation (SonTek, 2004).

Le rapport signal-à-bruit, en *dB*, correspond à l'intensité du signal réfléchi par les particules en suspension au-dessus du niveau de bruit. Il est proportionnel au nombre de particules en suspension dans l'écoulement sous étude. Un nombre de particules insuffisant réduit la qualité des mesures de vitesse. Le rapport signal-à-bruit doit être supérieur à *5dB* pour le PC-ADP (SonTek, 2004) et à *15dB* pour l'ADV (SonTek, 2001). Toutes les mesures recueillies dans cette étude respectent ce critère.

La corrélation mesure la similarité du signal réfléchi entre les deux impulsions d'une paire. Un pourcentage de corrélation de 100% signifie que les deux signaux d'une paire d'impulsions sont identiques, donc que toutes les particules sont demeurées dans le même volume d'échantillonnage et n'ont pas changé de direction (SonTek, 2004). Cependant, un *SNR* faible, un temps de résidence trop court, une redistribution turbulente des particules et l'interférence entre les impulsions,

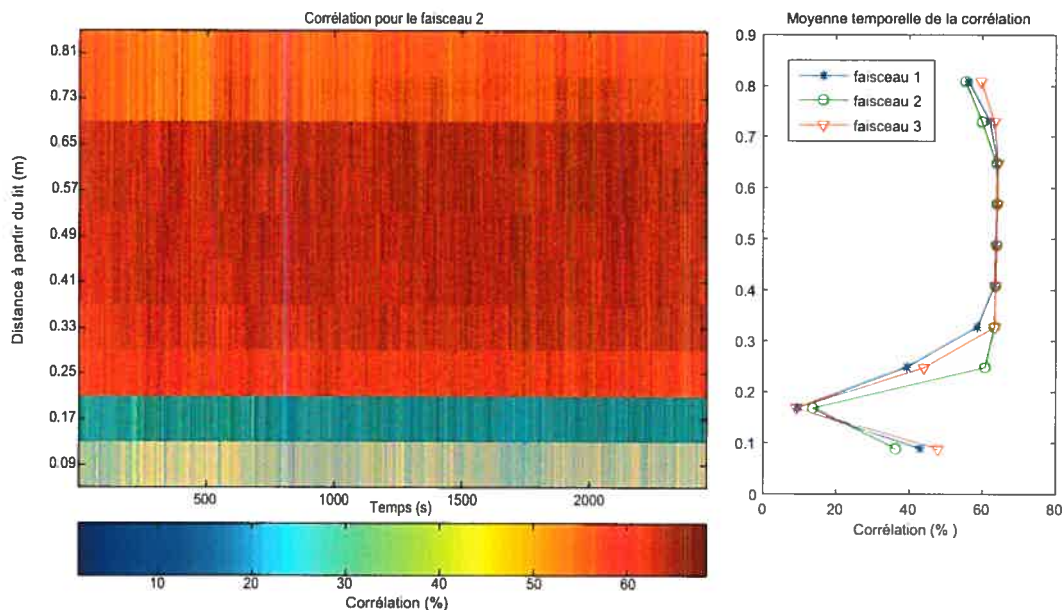


Figure 2.12 – Présence d’une zone affectée, à  $z=0.17$  mètres du lit, par l’interférence entre les impulsions.

réduisent le pourcentage de corrélation. La figure 2.12 donne un exemple d’interférence entre les impulsions. La cellule 9, à 17 cm au-dessus du lit, a une corrélation très faible, ce qui indique que ces mesures près du lit sont influencées par l’énergie acoustique des impulsions précédentes réfléchies par le lit qui sont demeurées dans le volume d’échantillonnage de la cellule. Les mesures de vitesse de cette cellule du profil doivent donc être rejetées complètement. Il est possible d’éliminer ces zones de décorrélation près du lit en ajustant le délai entre les impulsions (SonTek, 2004). Un délai entre les impulsions plus long, permet aux impulsions réfléchies sur le lit de sortir du volume d’échantillonnage des cellules près du lit avant que la mesure suivante n’ait lieu.

Pour l’ADV, qui échantillonne plus rapidement que le PC-ADP (25 fois plus vite), la corrélation est généralement plus élevée et devrait idéalement être entre 70 et 100% si les mesures de vitesse sont de qualité (SonTek, 2001).

### 2.5.1.2 Stationnarité

Une série temporelle est considérée comme quasi-stationnaire lorsque les tendances dans les données sont plus petites que les fluctuations (Soulsby, 1980). Nous utiliserons le *run test* (Bendat et Piersol, 1971) comme test statistique permettant de détecter si les données sont indépendantes et qu'aucune tendance n'est présente. La stationnarité de la moyenne et de la variance ont été testés. Les séries temporelles de vitesses ont été séparées en tranches de deux minutes. La moyenne et la variance de chaque tranche sont comparées à la moyenne et à la variance de l'ensemble du signal. Un *run* est défini comme une séquence d'observations identiques (en haut ou en bas de la moyenne ou de la variance de l'ensemble) qui est suivie et précédée par une observation différente. Le nombre de *runs* dans une série est lié à l'indépendance des observations et à la présence ou l'absence d'une tendance.

### 2.5.2 Résolution des ambiguïtés

Le logiciel fournit par la compagnie *Sontek*, *ViewADP*, peut corriger les profils de vitesses contenant quelques erreurs d'ambiguïté en utilisant la vitesse mesurée dans la cellule de résolution. Cette mesure de vitesse indépendante du profil de vitesse doit cependant être de bonne qualité (avec un pourcentage de corrélation plus grand que 50%) pour corriger les autres cellules du profil de vitesse (SonTek, 2004). Lorsque la mesure de vitesse de résolution est de mauvaise qualité, ce qui est habituellement le cas dans les écoulements rapides et turbulents, cette approche laisse des erreurs d'ambiguïté dans les séries temporelles du PC-ADP.

Lacy et Sherwood (2004) ont développé un algorithme de détection et de résolution des ambiguïtés qui améliore la procédure de SonTek. Premièrement, afin d'éliminer les pics causés par la mauvaise qualité des données, ils ont utilisé un filtre passe-bas (cutoff frequency = 1/6 Hz) avant d'estimer les vitesses de résolution. Ensuite, pour chaque profil, la vitesse de résolution de chaque faisceau est comparée à la vitesse mesurée pour le même faisceau dans la cellule qui est la plus près de la position de la cellule de résolution (généralement la deuxième ou troisième

cellule à partir de l'appareil). Si les deux vitesses diffèrent de plus de  $0.7 V_A$ , la vitesse est corrigée en ajoutant  $V_A$ . Cette vitesse corrigée est alors comparée à la vitesse dans la cellule adjacente que l'on corrige de la même façon si nécessaire. La même procédure est utilisée en comparant chaque paire de cellules adjacentes, dans un premier temps en montant vers la première cellule et finalement en descendant jusqu'à la dernière. De cette façon, dans les cellules corrigées, les vitesses pour deux cellules adjacentes diffèrent de moins de  $V_A$ . Cette méthode assume que le cisaillement vertical ne produit pas de différences de vitesses de l'ordre de  $V_A$  entre les cellules adjacentes pour des cellules de petite taille ( $\approx 10\text{cm}$ ).

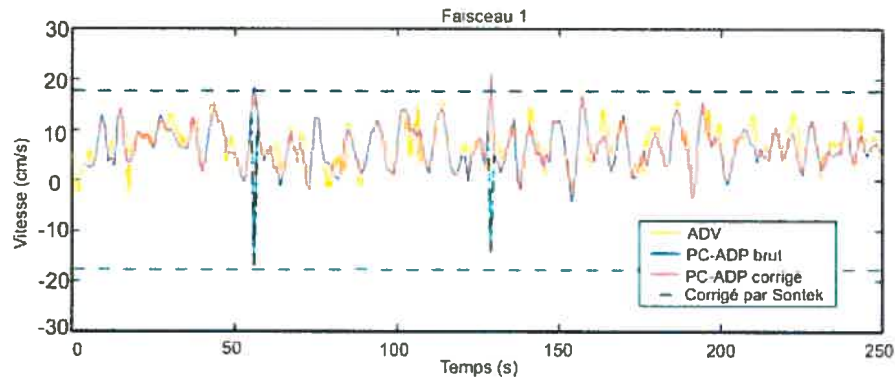


Figure 2.13 – Série temporelle de la vitesse radiale pour le faisceau 1 de la cellule 5 du PC-ADP et de l'ADV sans résolution des ambiguïtés et avec résolution des ambiguïtés utilisant l'algorithme de Lacy et Sherwood (2004) et celui de *Sontek*. Les lignes horizontales sont à  $V_A/2$ . Tiré de Lacy et Sherwood (2004).

Après avoir corrigé les erreurs dans chaque profil en utilisant la vitesse de résolution, la méthode de Lacy et Sherwood (2004) a recours à la série temporelle complète pour corriger les erreurs d'ambiguïté qui demeurent. Lorsque la différence entre une vitesse et celles au temps précédent et suivant est de plus de  $0.7 V_A$  celle-ci est corrigée en ajoutant ou soustrayant  $V_A$ . Cette procédure est effectuée sur les vitesses mesurées parallèlement aux faisceaux avant d'effectuer un changement de coordonnées.

La principale différence entre l'algorithme de Lacy et Sherwood (2004) et celui de SonTek est le filtre appliqué à la vitesse de résolution et l'utilisation de la série

temporelle pour identifier les erreurs d'ambiguïté. Cependant, lorsque l'écoulement est très rapide ou qu'il y a moins de particules en suspension dans l'écoulement, la corrélation de la vitesse de résolution diminue. La vitesse de résolution présente alors un nombre plus important de pics causés par cette faible corrélation. Si cette vitesse est filtrée uniquement avec un filtre passe-bas avec une fréquence de 1/6 Hz, ces pics sont encore présents dans le signal, entraînant une erreur d'estimation de la vitesse utilisée pour corriger les erreurs d'ambiguïté dans le profil (figure 2.14). Nous proposons trois modifications à l'algorithme de Lacy et Sherwood (2004), dont deux qui concernent le traitement de la vitesse de résolution :

1. un passage d'un premier filtre qui enlève d'abord les pics de valeurs extrêmes en utilisant la représentation de l'espace de phase (Goring et Nikora, 2002) de la vitesse de résolution. Le seuil d'identification des pics est fixé à celui recommandé par Goring et Nikora (2002) lorsque la corrélation moyenne de la vitesse de résolution est supérieure à 25% mais à une valeur plus sévère, plus faible de 30%, lorsque la corrélation moyenne est inférieure à 25%.
2. le passage d'un second filtre passe-bas à une fréquence plus basse que celle utilisée par Lacy et Sherwood (2004) qui lisse le signal de la vitesse de résolution. La vitesse de résolution sert uniquement à obtenir une idée de la vitesse moyenne de l'écoulement afin de corriger les vitesses mesurées par le PC-ADP. Les variations de vitesses plus petites que 30 secondes peuvent être enlevées du signal tout en gardant l'allure générale de la série temporelle.
3. critère de détection des erreurs d'ambiguïté plus sévère lors de la comparaison entre les cellules et dans la série temporelle :  $0.5 V_A$ . Pour les déploiements en rivière peu profonde, la vitesse ne varie généralement pas d'un facteur de  $0.5 V_A$  (de l'ordre de  $15 \text{ cms}^{-1}$ ) en l'espace de 0.5 à 1 seconde.

Deux hypothèses soutiennent l'ajout de ces modifications à l'algorithme de résolution des ambiguïtés. Premièrement, nous supposons que les valeurs extrêmes de la vitesse de résolution sont causées par la mauvaise corrélation des deux impulsions et ne correspondent pas à la vitesse réelle de l'écoulement. Deuxièmement,

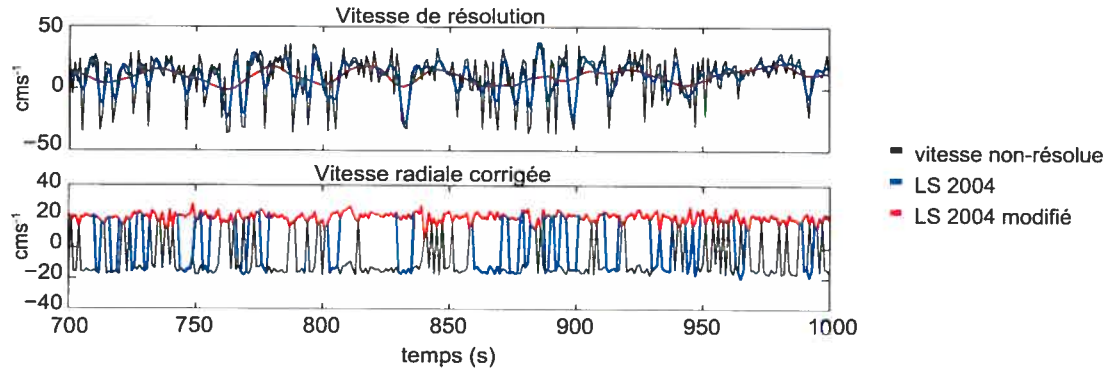


Figure 2.14 – Résolution des ambiguïtés utilisant l’algorithme de Lacy et Sherwood (2004), LS2004, et celui qui sera utilisé dans cette recherche, LS2004 modifié.

pour un écoulement en rivière, la série temporelle des vitesses ne devrait pas varier de  $0.5 V_A$  entre deux mesures de vitesses échantillonnées à 1 ou 2 Hz. Cet algorithme modifié de Lacy et Sherwood (2004) sera testé en comparant les données corrigées du PC-ADP avec celles de l’ADV.

### 2.5.3 Durée de l’échantillonnage

Afin d’estimer les statistiques turbulentes, nous devons d’abord déterminer une durée d’échantillonnage adéquate (Buffin-Bélanger et Roy, 2005). L’influence de la durée de l’échantillonnage sur l’estimation des trois premiers moments statistiques (moyenne, écart-type et asymétrie) sera examinée. La durée d’échantillonnage sera déterminée comme le temps nécessaire pour que ces trois statistiques deviennent stables.

### 2.5.4 Comparaison entre le PC-ADP et l’ADV

La comparaison des quantités relatives à la turbulence obtenues à partir du PC-ADP et de l’ADV est divisée en deux sections, soit la comparaison des mesures à l’intérieur des faisceaux et les profils comparatifs basés sur les vitesses en coordonnées cartésiennes. Pour les deux types de comparaison, la première étape dans le traitement des données est de filtrer les séries temporelles de vitesses de

l'ADV avec un filtre Butterworth ( $n=5$ ) à 1 Hz. Nous avons choisi ce type de filtre puisqu'il se rapproche d'un filtre parfait et nous permet d'enlever la contribution des fréquences plus petites que 1 Hz à la variance du signal. Les mesures d'ADV seront ensuite ré-échantillonnées à 1 Hz. Les séries provenant du PC-ADP et de l'ADV sont synchronisées en trouvant le délai qui maximise la corrélation entre les deux séries. Nous comparerons alors des séries temporelles ayant la même fréquence d'échantillonnage et les contributions des fréquences plus élevées que 1 Hz ne seront pas incluses dans nos analyses. Nous voulons ainsi évaluer l'effet du plus grand volume d'échantillonnage et du changement de coordonnées sur les mesures du PC-ADP par une comparaison avec des séries de mesures à 1 Hz dans un plus petit volume d'échantillonnage.

#### 2.5.4.1 Comparaison des vitesses radiales

Pour la comparaison des mesures à l'intérieur des faisceaux, la vitesse parallèle au faisceau 1 du PC-ADP,  $v_1$ , sera utilisée. Cependant, les vitesses de l'ADV sont mesurées en coordonnées cartésiennes et doivent alors être transformées afin d'obtenir une composante de vitesse qui correspond à  $v_1$  dans le système de coordonnées des faisceaux du PC-ADP. Les vitesses cartésiennes  $u$ ,  $v$  et  $w$  mesurées par l'ADV subiront d'abord une rotation afin que les valeurs moyennes des trois composantes de vitesses soient identiques à celles mesurées par le PC-ADP. Les instruments seront alors dans le même cadre de référence. Ensuite, les vitesses mesurées par l'ADV seront transformées en vitesses radiales en utilisant l'inverse de la matrice de changement de coordonnées du PC-ADP,  $T(\theta, \phi)$  (voir annexe I) :

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = T(\theta, \phi)^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

La composante de vitesse  $v_1$  obtenue par la transformation des mesures de vitesses de l'ADV sera alors parallèle à la vitesse radiale mesurée par le faisceau 1

du PC-ADP. Les vitesses mesurées dans les cellules 2, 4 et 6 par le PC-ADP seront comparées aux vitesses mesurées par l'ADV dans le volume d'échantillonnage correspondant à ces cellules. Les séries temporelles de  $v_1$  mesurées par le PC-ADP seront comparées à celles de l'ADV afin de tester l'algorithme de résolution des ambiguïtés. Les corrélations croisées entre les séries de vitesses des deux appareils permettront de vérifier l'accord entre les fluctuations de vitesses mesurées. Ensuite, les quatre premiers moments, soient la moyenne, l'écart-type, l'asymétrie et l'aplatissement, des distributions de vitesses ainsi que les spectres d'énergie seront comparés pour les mesures obtenues avec les deux appareils. Cette comparaison nous permettra d'évaluer la capacité du PC-ADP à mesurer les fluctuations de vitesses et de mettre en lumière l'influence du plus grand volume d'échantillonnage du PC-ADP sur les mesures de vitesse et la turbulence. De plus, l'effet combiné du bruit Doppler et du plus grand volume d'échantillonnage, et les effets du changement de coordonnées dans un écoulement non homogène sur les vitesses seront évalués à partir des équations de changement de coordonnées. La démarche de Nystrom (2001) à laquelle nous ajouterons la composante latérale de la vitesse de l'écoulement est utilisée pour cette analyse. Les détails de l'approche sont donnés à l'annexe II.

Afin de visualiser l'effet du changement de coordonnées sur les mesures du PC-ADP, les spectres d'énergie obtenus à partir des transformées en ondelettes seront analysés. L'analyse par ondelettes permet de combiner l'information en temps et en fréquence et de voir la dynamique des structures turbulentes et de mesurer leur contribution au spectre d'énergie (Farge, 1992). Contrairement aux transformées de Fourier, où l'information est généralisée à la durée du signal, la transformée en ondelettes conserve l'information locale du signal. En plus de savoir quelles fréquences sont présentes dans le signal, ce type de transformée permet d'identifier quand les événements correspondant à ces fréquences ont lieu. Deux types d'ondelettes seront utilisés pour décomposer les séries de vitesses : les fonctions Mexican Hat et Morlet



complexe.

$$\Psi_{MexH} = \frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-1/4}(1-t^2)e^{-t^2/2} \quad (2.1)$$

$$\Psi_{Morlet} = \pi^{-1/4}e^{i\omega_0 t}e^{-t^2/2} \quad (2.2)$$

La première est plus localisée en temps et a une largeur spectrale plus grande tandis que la fonction *Morlet* a une meilleure résolution en temps et est plus étendue dans le domaine de la fréquence. Cette différence entre les fonctions utilisées pour la décomposition du signal doit être prise en compte lors de l'interprétation des résultats. Nous utiliserons l'ondelette *Mexican Hat* afin d'avoir une représentation visuelle de l'énergie dans le temps ce qui permet de détecter et localiser les structures turbulentes. Les spectres de puissance d'ondelettes peuvent être ramenés à des spectres de densité d'énergie en additionnant les énergies à chaque pas de temps pour une fréquence donnée. On retrouve alors un spectre semblable à celui obtenu par les transformées de Fourier mais lissé par un filtre correspondant à la transformée de la fonction d'ondelette utilisée. Nous utiliserons la fonction *Morlet* complexe pour ce traitement puisqu'elle est davantage localisée dans le domaine des fréquences, ce qui nous permet d'avoir des pics mieux définis dans les spectres globaux.

Les programmes Matlab utilisés pour obtenir ces spectres d'énergies sont ceux de Torrence et Compo (1998) disponibles sur internet<sup>1</sup>. Le choix des échelles à analyser sera établi en suivant les recommandations de Torrence et Compo (1998) à partir du nombre de données de la série et du pas de temps.

#### 2.5.4.2 Comparaison des vitesses cartésiennes

Pour ce type de comparaison qui inclut des mesures d'ADV à quatre profondeurs différentes, les analyses se feront dans le système de coordonnées cartésiennes. Les mesures à l'intérieur des cellules 2, 4, 6 et 8 du PC-ADP seront comparées avec celles d'ADV placées à la profondeur correspondante à chaque cellule à moins de

---

<sup>1</sup><http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>

30 cm vers l'aval (section 2.4.1). Les séries de vitesses de chacun des appareils subiront une rotation pour obtenir des valeurs de 0 pour les moyennes des composantes latérale et verticale. Chacune des cellules du PC-ADP utilisées aura subi une rotation indépendante des mesures des autres cellules. Les mesures du PC-ADP ne constitueront donc pas un profil mais plutôt des mesures de vitesses indépendantes réalisées dans des cadres de référence différents dans la tranche d'eau. Les vitesses moyennes, l'écart-type, les spectres d'énergie, les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente seront estimés à partir des mesures de vitesse du PC-ADP et de l'ADV. À l'aide de ces comparaisons nous tenterons d'évaluer l'effet du changement de coordonnées dans un écoulement non homogène à l'intérieur du volume d'échantillonnage du PC-ADP sur les vitesses en coordonnées cartésiennes et sur l'estimation des paramètres de la turbulence.

### **2.5.5 Tests dans les différents milieux fluviaux**

Les tests du PC-ADP déployé dans plusieurs environnements fluviaux seront utilisés pour évaluer les capacités du PC-ADP à mesurer dans différentes conditions de rugosité, de profondeur et de vitesse moyenne. Plusieurs analyses seront effectuées sur les profils de vitesses, afin de faire ressortir les caractéristiques de la turbulence dans ces différents environnements. Tous les profils de vitesses subiront une rotation dans le plan horizontal afin d'obtenir une vitesse latérale moyenne nulle. Puisque l'appareil était bien orienté avec la verticale (à des angles plus petits que  $2^\circ$ ), nous avons conservé les vitesses verticales intactes.

#### **2.5.5.1 Résultats pour chaque milieu**

Afin d'évaluer la qualité des vitesses dans chacun des environnements, une attention particulière sera d'abord portée aux profils de rapport signal-à-bruit (SNR) et le pourcentage de corrélation dans chaque milieu. Les profils semi-logarithmiques de vitesse longitudinale moyenne,  $\bar{u}$ , nous permettront de déterminer la portion de l'écoulement affectée par l'interaction avec le lit. La pente de la relation qui relie  $\bar{u}$

en fonction de  $\ln(z)$  nous donne directement  $u^*/\kappa$  (équation 1.7). La rugosité,  $z_0$ , est donnée par la relation  $\exp(-b/m)$ , où  $b$  est l'ordonnée à l'origine de la droite et  $m$ , la pente. L'erreur statistique associée à l'estimation de la vitesse de cisaillement et de la rugosité sera calculée en utilisant la méthode de Wilkinson (1984). Les profils des cisaillements de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente nous permettront de décrire la dynamique turbulente sur toute la tranche d'eau de chaque environnement. De plus, la relation linéaire des cisaillements de Reynolds avec la profondeur nous permet d'obtenir une nouvelle estimation de la vitesse de cisaillement,  $u_R^*$ , à partir de la relation 1.9. Lorsque le profil des cisaillements de Reynolds ne représentera pas une relation linéaire, la valeur maximale du profil à  $z \sim 0.1 Z$  sera utilisée.

#### 2.5.5.2 Comparaison entre les environnements

Nous tenterons ensuite de faire ressortir les différences entre les milieux fluviaux en utilisant les caractéristiques mesurées par le PC-ADP. Les vitesses de cisaillement obtenues par la loi du mur,  $u_L^*$ , et par le profil linéaire des cisaillements de Reynolds,  $u_R^*$ , seront comparées pour tous les environnements testés. Ensuite, nous comparerons les profils normalisés des cisaillements de Reynolds et d'énergie cinétique turbulente des environnements testés avec la forme théorique attendue, donnée par les équations 1.8 et 1.9.

#### 2.5.5.3 Séquence avec les dunes mobiles

Les mesures de vitesses recueillies dans l'environnement comprenant des dunes mobiles seront analysées de façon différente. La figure 2.15 illustre la séquence temporelle de l'élévation du lit de la rivière. Les SNR élevés (90 dB) sont causés par le fort retour des impulsions sur le lit de la rivière.

Cette longue série d'environ une heure sera séparée en quatre séries temporelles afin de décrire le changement dans l'écoulement causé par le déplacement de la dune. La longueur des sections temporelles est déterminée par la durée d'échantillonnage

nécessaire pour l'estimation des statistiques expliquées à la section 2.5.3. Les profils des vitesses moyennes, des cisaillements de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente seront analysés pour chaque section temporelle. Ainsi, nous obtiendrons l'évolution temporelle des profils des caractéristiques moyennes et turbulentes en fonction du passage des dunes sur le lit de la rivière. De plus, les transformées en ondelettes seront utilisées dans cette section afin de visualiser le changement dans le temps de la contribution de chaque fréquence à la variance de la mesure. Nous détecterons ainsi l'évolution temporelle de la distribution en fréquence des structures turbulentes de l'écoulement.

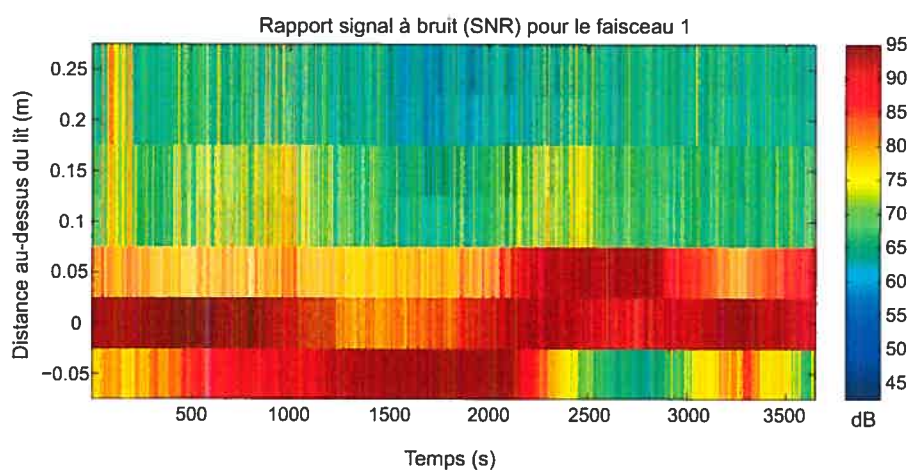


Figure 2.15 – Série temporelle du rapport signal à bruit mesuré par le PC-ADP illustrant la position du lit.

## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS DE LA COMPARAISON ENTRE LE PC-ADP ET L'ADV

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les capacités du PC-ADP à mesurer dans un écoulement turbulent en comparant sa performance avec celle d'un ADV. Après avoir abordé l'algorithme de résolution des ambiguïtés et la sélection de la durée de l'échantillonnage, nous présenterons les résultats de la comparaison qui portera d'abord sur les vitesses radiales et ensuite sur les vitesses cartésiennes. La première comparaison fait intervenir uniquement les mesures d'ADV effectuées à l'intérieur des cellules du faisceau 1 du PC-ADP et elle concerne donc la vitesse parallèle au faisceau 1,  $v_1$ , mesurée par les deux appareils. L'objectif de la comparaison des vitesses radiales mesurées par le PC-ADP et l'ADV sera de déterminer l'influence du bruit Doppler et de la taille du volume d'échantillonnage dans les mesures de vitesse parallèles aux faisceaux du PC-ADP. Ensuite, nous estimerons les vitesses en coordonnées cartésiennes à partir de ces vitesses radiales pour les deux instruments. Ceci permettra d'évaluer les effets du changement de coordonnées. La deuxième comparaison concerne les vitesses en coordonnées cartésiennes mesurées par l'ADV et le PC-ADP à différentes profondeurs. Puisque les mesures d'ADV sont filtrées et ré-échantillonnées à 1 Hz et que la géométrie de l'ADV fait en sorte que le changement de coordonnées est toujours valide peu importe le type d'écoulement, ces comparaisons mettront en lumière l'erreur introduite par le changement de coordonnées dans les mesures de vitesses du PC-ADP.

#### 3.1 Test de l'algorithme de résolution des ambiguïtés

En rivière peu profonde, la longueur du profil du PC-ADP,  $r_{max}$ , est limitée par la profondeur de la rivière. Pour un profileur cohérent utilisant des ondes acoustiques de 1.5 MHz avec  $r_{max} = 1\text{ m}$ , la vitesse maximale mesurée sans ambiguïté est

de  $\pm 19 \text{ cms}^{-1}$  (parallèlement aux faisceaux). Cette vitesse correspond à une vitesse horizontale de  $\pm 73 \text{ cms}^{-1}$ , dans le cas où les faisceaux du profileur sont orientés à  $15^\circ$  par rapport à la verticale. Les vitesses se retrouvant à l'extérieur de cet intervalle seront donc contaminées par des erreurs d'ambiguïté. L'algorithme de Lacy et Sherwood (2004), que nous avons modifié et décrit à la section 2.5.2 a été utilisé pour détecter et corriger les erreurs d'ambiguïté. Cet algorithme a été appliqué sur toutes les mesures de vitesses du PC-ADP, contaminées ou non par des erreurs d'ambiguïté. La figure 3.1 illustre un exemple de résolution des erreurs d'ambiguïté dans les séries de vitesses mesurées par le PC-ADP comparées à une mesure simultanée effectuée avec l'ADV. Ce signal est très fortement contaminé par les erreurs d'ambiguïtés puisqu'il a été recueilli dans un écoulement dont la vitesse moyenne se rapproche de la vitesse maximale mesurée sans ambiguïté ( $V_A = \pm 18 \text{ cms}^{-1}$ ). La série de vitesse mesurée par le PC-ADP (en noir dans la figure) interprète les vitesses supérieures à  $V_A$  comme étant des vitesses négatives. L'algorithme de résolution des ambiguïtés utilisé ici détecte et corrige ces erreurs et remplace les vitesses négatives à leur valeur réelle qui correspond à la vitesse mesurée par l'ADV.

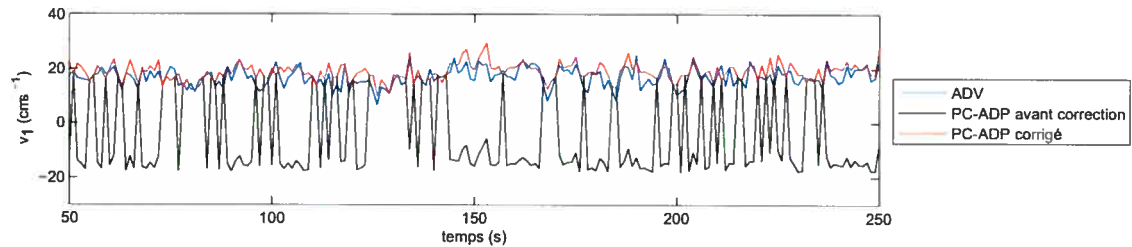


Figure 3.1 – Comparaison de la vitesse parallèle au faisceau 1 mesurée par l'ADV et le PC-ADP le 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ). Les données mesurées avec l'ADV ont été filtrées et ré-échantillonnées à 1 Hz.

L'algorithme corrige toutes les erreurs d'ambiguïté à l'exception des erreurs qui se retrouvent au début ou à la fin de la série temporelle. Ces erreurs ne peuvent être corrigées adéquatement puisque la correction nécessite une mesure au temps précédent et suivant la vitesse instantanée que l'on examine. Ces points (généralement moins de cinq mesures au début ou à la fin) sont donc enlevés de la série temporelle. L'exemple présenté ici est un exemple de mesures fortement contaminées. Lorsque

l'écoulement est moins rapide ou lorsque  $V_A$  est plus élevée, le nombre d'erreurs d'ambiguïté dans la série diminue. L'algorithme détecte et corrige adéquatement les erreurs dans le cas des séries de vitesses qui contiennent un moins grand nombre d'erreurs d'ambiguïté.

Les ambiguïtés sont résolues dans les séries de vitesses radiales,  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$ , avant d'effectuer le changement de coordonnées. Comme le faisceau 1 est orienté avec la direction de l'écoulement, la composante de vitesse parallèle au faisceau 1,  $v_1$ , est habituellement plus élevée que les composantes de faisceau 2 et 3 et est davantage affectée par les erreurs d'ambiguïté.

L'algorithme de résolution des ambiguïtés de Lacy et Sherwood (2004) que nous avons modifié corrige adéquatement les vitesses mesurées par le PC-ADP recueillies dans un écoulement très rapide ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ). La comparaison avec des mesures simultanées d'ADV nous a permis de vérifier que les vitesses supérieures à  $V_A$  mesurées par le PC-ADP sont corrigées et correspondent à la vitesse réelle de l'écoulement (estimée par l'ADV).

### 3.2 Durée de l'échantillonnage

Pour décrire correctement les caractéristiques de l'écoulement, les séries temporelles doivent être suffisamment longues afin d'inclure les plus grandes structures turbulentes de l'écoulement. Pour évaluer la longueur nécessaire des séries temporelles de vitesses pour obtenir des statistiques fiables, nous avons estimé les trois premiers moments statistiques de la vitesse longitudinale en fonction de la longueur de la série.

La figure 3.2 représente deux exemples typiques des séries de vitesses mesurées par le PC-ADP. Les mesures du 13 juillet ont été effectuées à une profondeur de 1 mètre dans un écoulement de  $30 \text{ cms}^{-1}$  en présence de rides et celle du 25 juillet dans un écoulement de  $70 \text{ cms}^{-1}$  de 97 cm de profondeur en présence de dunes. La moyenne et l'écart-type se stabilisent généralement plus rapidement que l'asymétrie. Ce moment statistique de troisième ordre a été inclus dans notre analyse

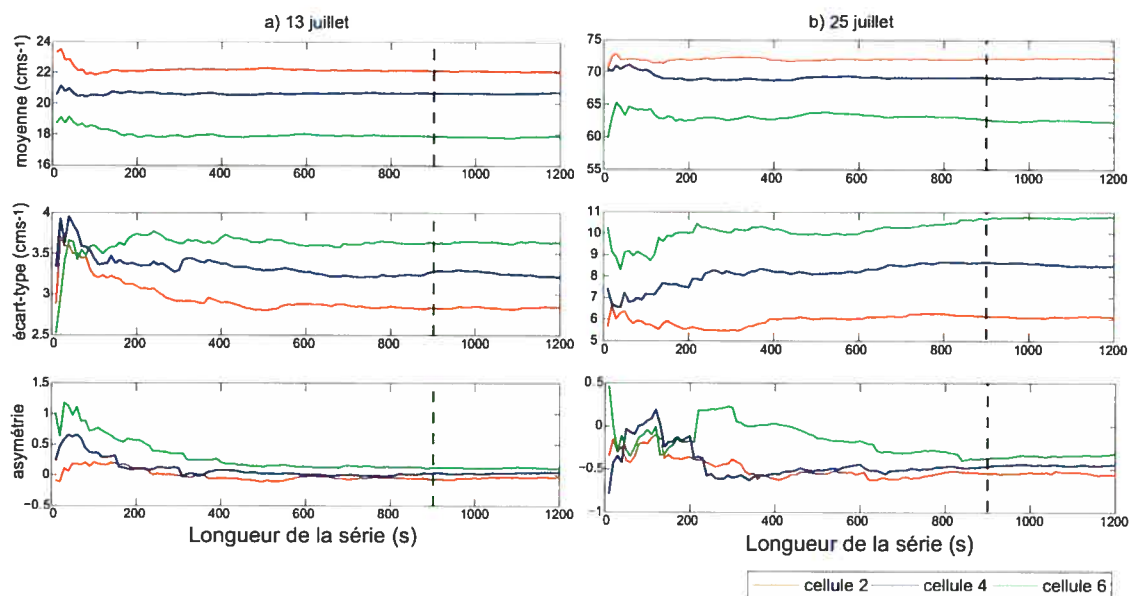


Figure 3.2 – Exemples de variation des trois premiers moments statistiques d’une série de vitesses du PC-ADP en fonction de la longueur d’échantillonnage. La ligne pointillée verticale indique la position du temps 900 s (15 minutes).

puisque’il est fortement influencé par la distribution des vitesses loin de la moyenne, donc par les plus grandes fluctuations. Par inspection visuelle, nous avons évalué que le temps nécessaire à la stabilisation des trois statistiques est d’environ 900 secondes (15 minutes).

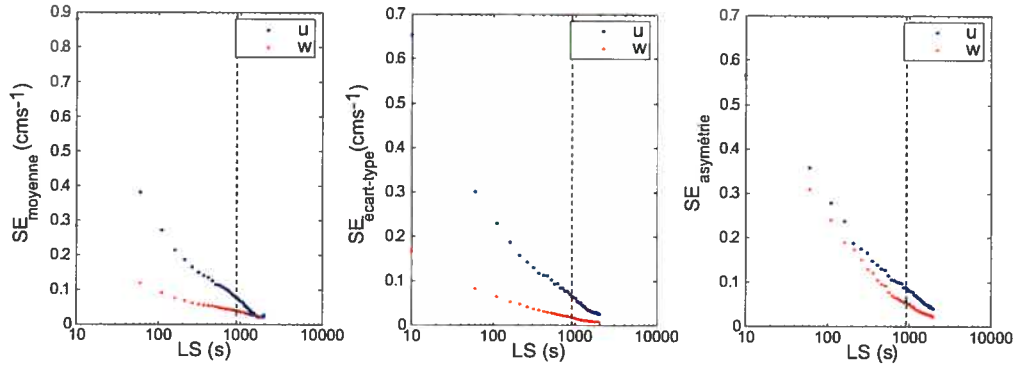
Ce résultat concorde avec ceux obtenus dans d’autres études. Barua et Rahman (1998) ont avancé que les séries de vitesses, recueillies à une fréquence de 0.1 à 0.2 Hz, devraient être de 15 minutes dans une rivière d’environ 10 mètres de profondeur. Muste *et al.* (2004a) a proposé une durée d’échantillonnage de 11 minutes à partir des séries de vitesse recueillies à 0.625 Hz dans une rivière de 4 mètres de profondeur. Puisque la taille des structures est fonction de la profondeur de l’écoulement et que l’on cherche à mesurer un certain nombre de ces structures pour en estimer les propriétés, on devrait anticiper que la longueur de l’échantillon diminue avec la profondeur. Cependant, suite à notre analyse, nous proposons une durée d’échantillonnage aussi longue que celle utilisée pour des environnements plus profonds. Ceci peut être expliqué par le fait que nous avons inclus le troisième moment



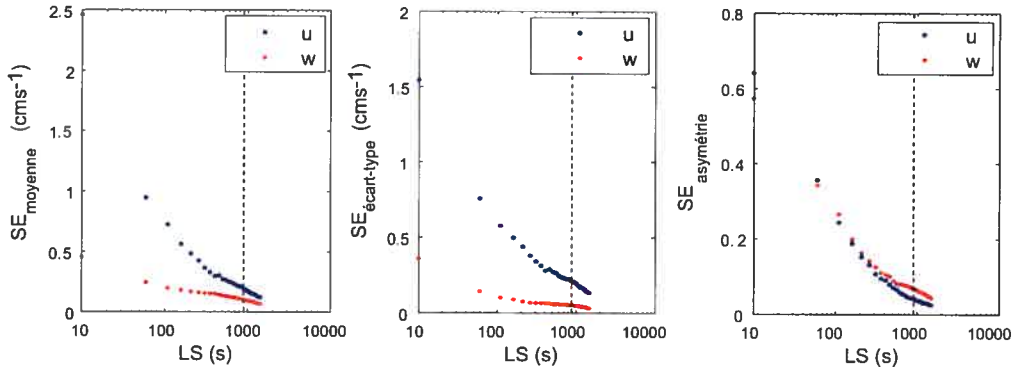
statistique dans notre analyse, qui est influencé par la distribution des vitesses loin de la moyenne, alors que les deux études en rivière plus profonde considéraient uniquement les deux premiers moments. Le temps nécessaire à la stabilisation de l'asymétrie est généralement supérieur à celui de la moyenne et de l'écart-type, puisque les fluctuations loin de la moyenne sont moins fréquentes.

Pour évaluer l'erreur sur l'estimation des statistiques en fonction de la durée de l'échantillonnage, la méthode de Buffin-Bélanger et Roy (2005) est utilisée. Nous avons testé des longueurs de séries temporelles allant de 10 à 1500 secondes en utilisant une méthode de *Bootstrapping*. Pour chacune des longueurs de séries temporelles testées, nous avons estimé l'erreur-type (*SE*) des statistiques pour 1000 sous-échantillons, situés de façon aléatoire dans la série, et d'une durée équivalente à celle testée. La figure 3.3 montre deux exemples de séries de vitesses mesurées par le PC-ADP dans des environnements différents (les mesures de la cellule 2 des séries de vitesses de la figure 3.2).

Cependant, contrairement aux résultats de Buffin-Bélanger et Roy (2005), aucune rupture de pente n'est visible sur les graphiques semi-logarithmiques de l'erreur en fonction de la longueur de l'échantillon. L'absence d'un bris de pente clair nous empêche de déterminer de façon quantitative la durée optimale des séries temporelles comme l'avaient fait Buffin-Bélanger et Roy (2005). Par contre, lorsque la durée des échantillons est de 900 secondes (ligne pointillée sur le graphique 3.3), l'erreur sur l'estimation des statistiques est faible, soit moins de 1% pour la moyenne et 4% pour l'écart-type. Ces résultats concordent avec ceux de Gonzalez-Castro *et al.* (2000) qui ont estimé que l'erreur sur l'estimation des statistiques était de 13% pour une série de mesures d'ADP échantillonnées à 1 Hz de 5 minutes et de 2.2% pour 30 minutes. L'erreur sur l'estimation des deux premiers moments statistiques d'une série de vitesse de PC-ADP de plus de 15 minutes associée à la durée de l'échantillonnage sera donc négligeable dans les analyses qui suivent, étant inférieure à 1% et 4%.



(a) Série mesurée le 13 juillet à 74 cm au dessus du lit ( $\bar{u} = 30 \text{ cm s}^{-1}$ )



(b) Série mesurée le 25 juillet à 69 cm au dessus du lit ( $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$ )

Figure 3.3 – Erreur-type ( $SE$ ) de l'estimation de la moyenne, de l'écart-type et de l'asymétrie en fonction de la longueur des séries temporelles ( $LS$ ).

### 3.3 Comparaison des vitesses radiales

Les vitesses radiales (parallèles au faisceau 1) mesurées par le PC-ADP ont été comparées aux mesures d'ADV. Les vitesses mesurées par l'ADV, dont le volume d'échantillonnage a été placé près du centre de la cellule du PC-ADP visée, ont d'abord subi une rotation pour être placées dans le même cadre de référence que les vitesses mesurées par le PC-ADP. Ensuite, chaque série de vitesse de l'ADV a été filtrée et ré-échantillonnée à 1 Hz. Les figures 3.4 et 3.5 montrent des exemples de comparaison des vitesses radiales pour les deux appareils. On note que les vitesses

mesurées par l'ADV et le PC-ADP se suivent bien en général. Il existe cependant quelques écarts importants, notamment pour les faibles vitesses où celles mesurées par l'ADV tendent à être plus basses.

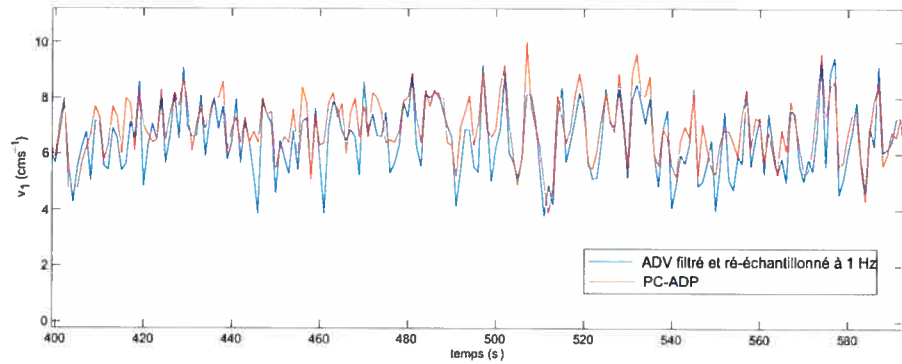


Figure 3.4 – Exemple de série temporelle de la vitesse radiale du faisceau 1,  $v_1$  (13 juillet cellule 2), recueillies dans un écoulement à  $30 \text{ cm.s}^{-1}$  à  $74 \text{ cm}$  au-dessus du lit.

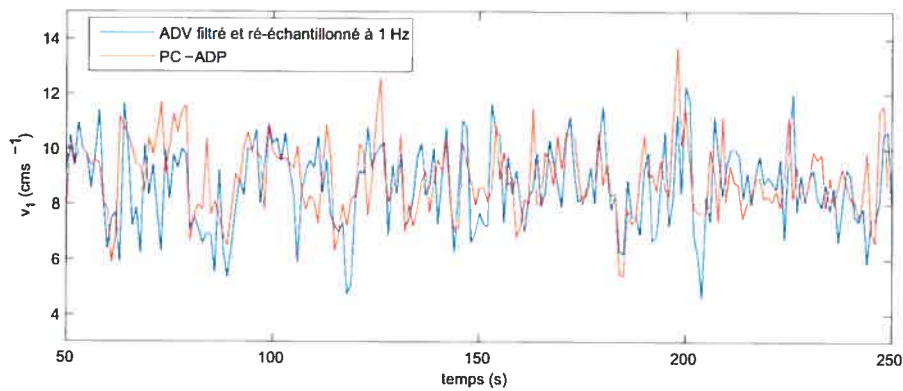


Figure 3.5 – Exemple de série temporelle de la vitesse radiale du faisceau 1,  $v_1$  (13 juillet cellule 6), recueillies dans un écoulement à  $30 \text{ cm.s}^{-1}$  à  $37 \text{ cm}$  au-dessus du lit.

Les coefficients de corrélation croisée ( $r$ ) estimés entre les vitesses des deux séries temporelles sont donnés dans le tableau 3.1. Les coefficients de corrélation pour les données du 13 juillet semblent diminuer en se rapprochant du lit. Cependant, les mesures qui ont les corrélations les plus élevées sont celles de la cellule 6 du 20 juillet effectuées près du lit, soit à  $25 \text{ cm}$ . La diminution de la corrélation pour les mesures

près du lit de la journée du 13 juillet est peut-être due à un mauvais positionnement de l'ADV en s'éloignant de la surface de l'eau. Même si les vitesses de l'ADV ont subi une rotation pour être placées dans le même cadre de référence que celles du PC-ADP, l'alignement entre les deux instruments n'était peut-être pas parfait. Il était très difficile sur le terrain de placer l'ADV exactement au centre du volume d'échantillonnage correspondant aux cellules du PC-ADP visées. L'ADV, n'étant pas muni d'un niveau interne comme le PC-ADP, est difficile à placer dans le même cadre de référence surtout lorsque le volume d'échantillonnage est loin de la surface de l'écoulement. Nystrom (2001), qui a effectué ce même type de comparaison en laboratoire, a obtenu des coefficients de corrélations croisées de 0.75 à 0.88.

	13/07			20/07	25/07
	cel 2	cel 4	cel 6	cel 6	cel 6
$r$	0.75	0.59	0.47	0.78	0.59

Tableau 3.1 – Corrélations croisées entre les séries temporelles des fluctuations de vitesses mesurées par le PC-ADP et l'ADV

### 3.3.1 Comparaison des moments

Les tableaux 3.2 et 3.3 présentent les valeurs des moments estimées à partir des séries temporelles de la vitesse radiale,  $v_1$ , recueillies par les deux instruments dans les trois environnements différents. L'accord entre les deux instruments est généralement bon pour tous les moments.

	cel 2		cel 4		cel 6	
	PC-ADP	ADV	PC-ADP	ADV	PC-ADP	ADV
moyenne ( $cms^{-1}$ )	6.83	6.48	8.91	8.53	9.06	8.82
écart-type ( $cms^{-1}$ )	1.09	1.18	1.27	1.33	1.35	1.42
asymétrie	-0.04	-0.03	0.07	0.05	-0.10	-0.03
aplatissement	3.14	2.92	3.05	3.02	3.10	3.11

Tableau 3.2 – Statistiques pour les mesures du 13 juillet ( $\bar{u} = 30 \text{ } cms^{-1}$ )

	20 juillet	cel 6	25 juillet	cel 6
	PC-ADP	ADV	PC-ADP	ADV
moyenne ( $cms^{-1}$ )	14.08	12.65	19.06	16.87
écart-type ( $cms^{-1}$ )	1.80	1.92	3.18	3.27
asymétrie	-0.21	-0.32	-0.27	-0.19
aplatissement	3.19	3.19	3.49	3.20

Tableau 3.3 – Statistiques pour les mesures du 20 ( $\bar{u} = 45 \text{ } cms^{-1}$ ) et du 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ } cms^{-1}$ ).

La valeur de la vitesse moyenne mesurée par le PC-ADP est plus grande que celle mesurée par l'ADV. L'écart entre les vitesses moyennes mesurées par les deux instruments augmente avec la vitesse moyenne de l'écoulement. Pour les trois environnements testés, le PC-ADP a tendance à sous-estimer l'écart-type par rapport aux mesures d'ADV. L'écart entre les estimés d'écart-type, qui varie entre  $0.06$  et  $0.12 \text{ } cms^{-1}$ , ne semble pas dépendre de la vitesse de l'écoulement. Pour les moments de troisième et quatrième ordre, l'asymétrie et l'aplatissement, l'accord est bon entre les quantités mesurées par le PC-ADP et l'ADV. L'asymétrie se rapproche de zéro, la valeur caractéristique d'une distribution normale, mais est généralement négative à l'exception de la mesure du 13 juillet dans la cellule 4. L'aplatissement est légèrement plus grand que 3, ce qui indique la présence de fluctuations de vitesses loin de la moyenne. Les distribution des fluctuations de vitesse sont comparées à une distribution normale dans la figure 3.6.

Les séries du 13 juillet, beaucoup plus longues (55 minutes) que celles des deux autres journées (séries de 9 à 10 minutes) permettent de mieux définir la distribution des vitesses puisqu'elles comprennent un plus grand nombre de données. Les trois séries recueillies cette même journée (à l'intérieur des cellules 2, 4 et 6) présentent des distributions semblables et se rapprochent d'une distribution normale. L'écart-type des séries temporelles des fluctuations de vitesse mesurées par le PC-ADP est plus faible que celui de la distribution des mesures d'ADV, ce qui explique que le plus grand nombre de mesures près de la moyenne et la forme plus étroite des distributions mesurées par le PC-ADP. Les distributions des deux autres journées,

qui comptent un moins grand nombre de données, sont celles où l'asymétrie et l'aplatissement s'éloignent le plus des valeurs normales (voir tableau 3.3).

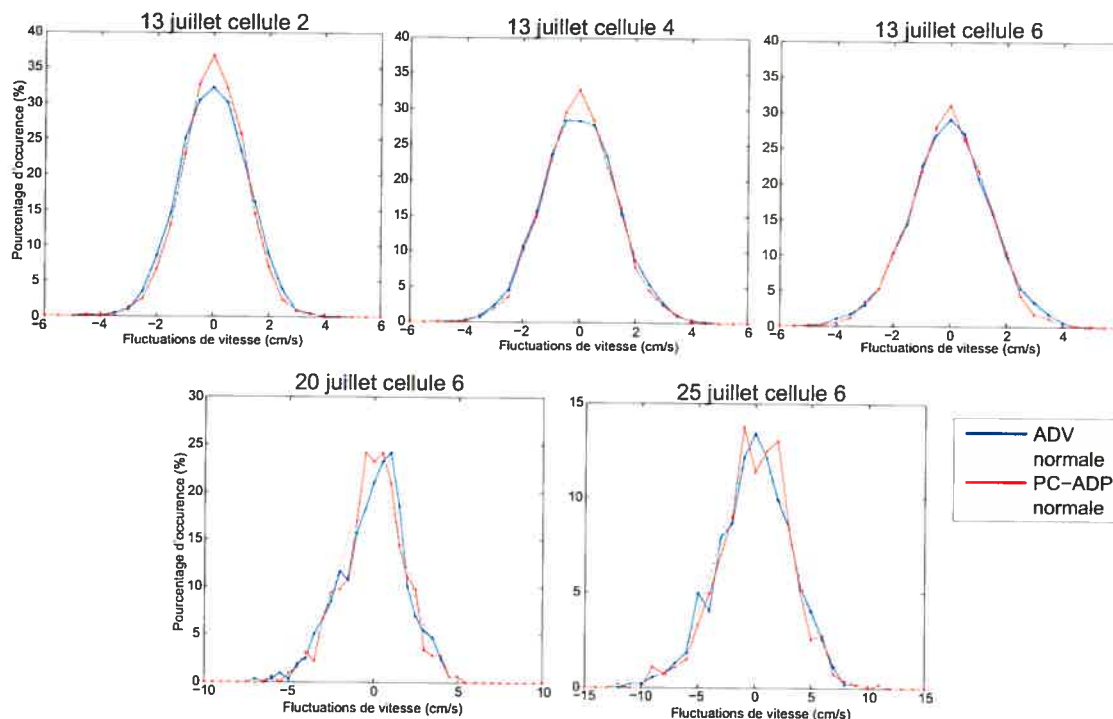


Figure 3.6 – Distributions des fluctuations de vitesse radiale du faisceau 1 pour les trois environnements.

### 3.3.2 Spectres d'énergie

Les spectres d'énergie nous permettent de vérifier si les deux instruments captent la même variance dans les mêmes fréquences. Cet outil sera utilisé pour examiner les effets du bruit et du volume d'échantillonnage sur les mesures effectuées par les deux appareils. Puisque les mesures du PC-ADP sont échantillonnées à 1 Hz et que les mesures d'ADV sont filtrées et ré-échantillonnées à 1 Hz, les spectres d'énergie ne nous permettront pas d'examiner la distribution de variance à des fréquences supérieures à 0.5 Hz. Les mesures du 13 juillet, d'une durée de 55 minutes, permettent de mieux représenter la distribution en fréquence de la variance que les plus courtes séries des deux autres journées.

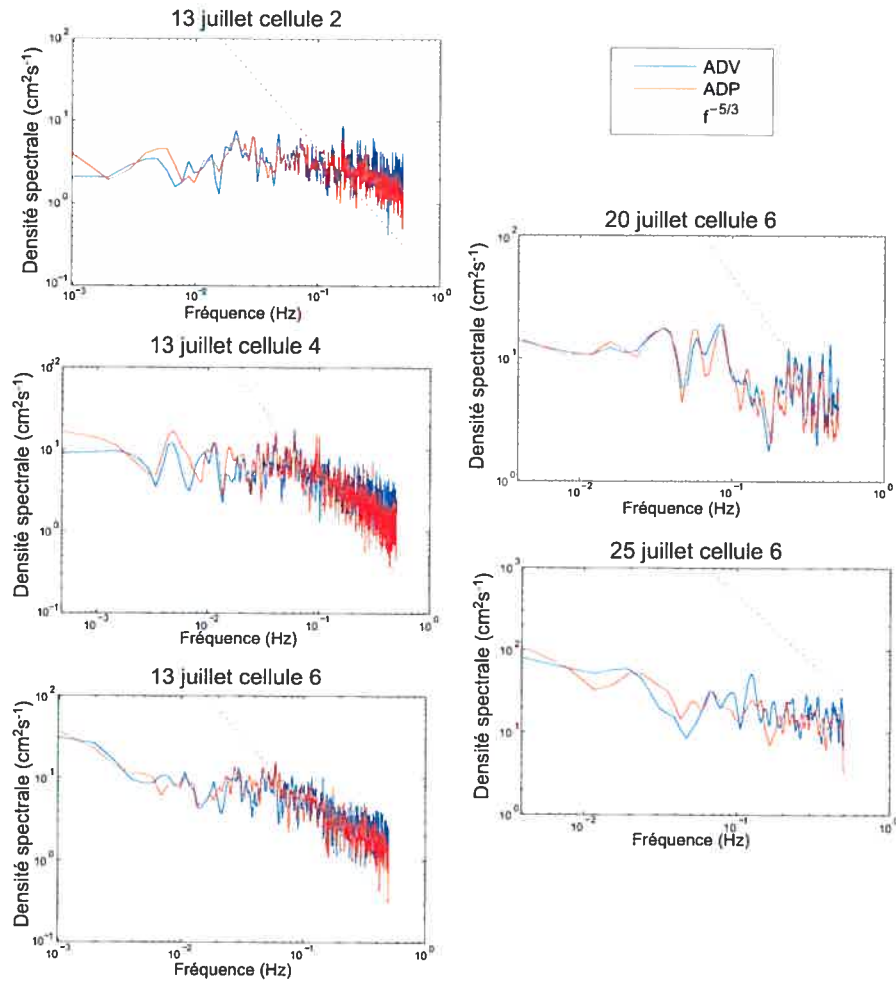


Figure 3.7 – Spectres d'énergie de la vitesse radiale,  $v_1$ , pour les trois séries du 13 juillet et pour celles du 20 et du 25 juillet.

Les spectres du 25 juillet est celui où la différence entre les mesures des deux appareils est la plus marquée. Le coefficient de corrélation croisée était de 0.59 entre les mesures des deux instruments. Les spectres d'énergie de la vitesse radiale,  $v_1$  du PC-ADP, du 13 et 20 juillet (figure 3.7) correspondent bien à ceux obtenus à partir des mesures de la vitesse radiale de l'ADV dans les plus basses fréquences. Une perte de variance est visible dans les hautes fréquences ( $> 0.1$  Hz), où l'énergie des mesures d'ADV est supérieure à l'énergie des mesures du PC-ADP. Cette différence pourrait être attribuée à la plus grande proportion de bruit dans les mesures d'ADV dans les hautes fréquences. Cependant, comme les mesures d'ADV ont été filtrées

et ré-échantillonnées à 1 Hz et que le bruit Doppler qui contamine habituellement les vitesses se situe à des fréquences plus élevées que 1 Hz (Voulgaris et Trowbridge, 1998), la proportion de ce type de bruit dans les séries d'ADV est ici probablement minime. De plus, aucun pic n'est présent dans les signaux de vitesses d'ADV. La différence de variance entre les deux instruments est probablement causée par le plus grand volume d'échantillonnage du PC-ADP. La hauteur des cellules est de 9 cm pour les mesures du 13 juillet et de 8 cm pour celles du 20 juillet. Le plus grand volume d'échantillonnage du PC-ADP ne permet pas de capter les plus petites fluctuations de vitesses (Soulsby, 1980).

Avec une fréquence d'échantillonnage à 1 Hz, le PC-ADP ne permet pas de capter entièrement le *inertial subrange*. Le début d'une plage de fréquences caractérisée par une pente de  $-5/3$  sur les spectres d'énergie est visible sur les spectres des mesures du 13 juillet (dans un écoulement à  $\bar{u} = 30 \text{ cm s}^{-1}$ ) dans les fréquences de 0.1 à 0.5 Hz. Par contre, les spectres des mesures des deux autres journées recueillies dans des écoulements plus rapides ne permettent pas d'identifier une pente de  $-5/3$ .

### 3.3.3 Bruit Doppler et effet du volume d'échantillonnage

La variance associée au bruit,  $\sigma_n^2$ , peut être estimée en calculant la différence de variance entre les vitesses radiales du faisceau 1 mesurées par le PC-ADP et celles mesurées par l'ADV (voir l'annexe II pour les détails). Cette différence de variance quantifie l'effet combiné du bruit Doppler et du plus grand volume d'échantillonnage sur les mesures du PC-ADP. Les valeurs de  $\sigma_n^2$  pour les trois environnements testés sont présentées au tableau 3.4. Le signe de la différence de variance entre les deux appareils est conservé afin d'indiquer une sous-estimation (différence négative) ou une sur-estimation (différence positive) de la variance par le PC-ADP par rapport à l'ADV.

Pour les trois environnements testés, le PC-ADP sous-estime la variance par rapport à l'ADV. La mesure de vitesse par le PC-ADP correspond à la moyenne de 12 à 14 échantillons de mesures,  $N$ , effectuées à l'intérieur du volume de la cellule



Série	$\bar{u}(cms^{-1})$	Cellule	N	$\sigma_n^2(cm^2s^{-2})$	$\sigma_{un}^2(cm^2s^{-2})$	$\sigma_{wn}^2(cm^2s^{-2})$
13/07	30	2	12	-0.19	-1.87	-0.07
13/07	30	4	12	-0.17	-1.64	-0.06
13/07	30	6	12	-0.20	-1.95	-0.07
20/07	45	6	15	-0.38	-3.74	-0.13
25/07	70	6	14	-0.60	-6.01	-0.22

Tableau 3.4 – Effet combiné du bruit Doppler et du plus grand volume d'échantillonnage dans les mesures des trois composantes de vitesses ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) du PC-ADP.

(d'une hauteur de 8 à 9 cm) contrairement à l'ADV qui mesure la vitesse dans un volume d'environ 300  $mm^3$ . Puisque la mesure de vitesse du PC-ADP correspond à une moyenne des vitesses mesurées pendant une seconde dans un volume plus grand, la variance de cette mesure sera plus faible que celle d'une seule mesure de vitesse effectuée à chaque seconde situé à un point à l'intérieur de ce volume. Cette moyenne spatiale et temporelle diminue la variance, ce qui compense la proportion de bruit Doppler qui pourrait être plus élevée dans les mesures du PC-ADP.

À partir du bruit présent dans les vitesses radiales,  $\sigma_n^2$ , nous pouvons estimer la quantité de ce bruit qui se retrouvera dans la composante longitudinale,  $\sigma_{un}^2$ , latérale  $\sigma_{vn}^2$  et verticale,  $\sigma_{wn}^2$ , après le changement de coordonnées (voir les calculs dans l'annexe II) :

$$\sigma_{un}^2 = 9.95 \sigma_n^2 \quad (3.1)$$

$$\sigma_{vn}^2 = 9.95 \sigma_n^2 \quad (3.2)$$

$$\sigma_{wn}^2 = 0.357 \sigma_n^2 \quad (3.3)$$

Le bruit présent dans les vitesses radiales va se retrouver dans les vitesses longitudinales, latérales et verticales. Puisque les faisceaux du PC-ADP sont inclinés à 15° par rapport à la verticale, le bruit sera plus important dans les composantes longitudinale et latérale que verticale. Les valeurs de  $\sigma_{un}^2$ ,  $\sigma_{vn}^2$  et  $\sigma_{wn}^2$ , données au tableau 3.4, sont calculées à partir des équations 3.1, 3.2 et 3.3 et de la variance

associée au bruit  $\sigma_n^2$ . L'effet de la moyenne spatiale et temporelle qui diminue la variance dans les vitesses radiales se retrouve dans les vitesses en coordonnées cartésiennes. La perte de variance associée à cet effet est multipliée par un facteur 9.95 pour les composantes longitudinale et latérale et par un facteur de 0.357 pour la composante verticale. Le changement de coordonnées devrait, si l'écoulement est homogène, causer une diminution de la variance des vitesses longitudinales, latérales et verticales par rapport à l'ADV qui ne dépend pas de la distance par rapport à l'instrument.

### 3.3.4 Effet du changement de coordonnées

L'effet du changement de coordonnées dans un écoulement turbulent non homogène peut être déduit en connaissant  $\sigma_{un}^2$  et la différence,  $\Delta\sigma_u^2$ , entre la variance des vitesses longitudinales mesurées par le PC-ADP et la variance mesurée par l'ADV, que l'on postule comme étant près de la variance réelle.

$$\sigma_{uc}^2 = \Delta\sigma_u^2 - \sigma_{un}^2 \quad (3.4)$$

La variance ajoutée par le changement de coordonnées,  $\sigma_{uc}^2$ , peut ainsi être évaluée pour les trois environnements et pour les deux autres composantes de vitesse (tableau 3.5).

Série	$\bar{u}(cms^{-1})$	Cellule	$\sigma_{uc}^2(cm^2s^{-2})$	$\sigma_{vc}^2(cm^2s^{-2})$	$\sigma_{wc}^2(cm^2s^{-2})$
13/07	30	2	6.50	5.06	-0.38
13/07	30	4	8.98	8.12	-0.59
13/07	30	6	11.17	11.43	-0.73
20/07	45	6	19.05	15.64	-1.49
25/07	70	6	55.44	32.00	-3.52

Tableau 3.5 – Effet du changement de coordonnées sur la variance des mesures de vitesses des trois composantes de vitesses ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) du PC-ADP. Le signe de la différence de variance entre les deux appareils indique une sous-estimation ou une sur-estimation de la variance par le PC-ADP par rapport à l'ADV.

Contrairement à ce qui a été calculé pour un écoulement homogène, le changement de coordonnées effectué sur les mesures radiales du PC-ADP augmente la variance des composantes longitudinales et latérales. Le fait que l'écoulement est non homogène ajoute un bruit qui augmente la variance de ces composantes de vitesses. L'effet contraire est observé pour la composante verticale qui voit sa variance diminuer. L'ajout de bruit semble s'accroître avec la distance par rapport à l'instrument, ce qui n'était pas le cas de l'effet de la moyenne spatiale et temporelle sur les mesures de vitesses radiale. Plus les mesures sont effectuées loin de l'instrument, plus la distance entre les faisceaux est grande et plus le postulat de l'homogénéité de l'écoulement est mis en doute.

L'examen visuel des séries temporelles laisse clairement voir l'effet du changement de coordonnées. L'exemple de la figure 3.8 montre les vitesses en coordonnées cartésiennes de la même série temporelle présentée plus tôt, à la figure 3.4. On y voit l'augmentation de la variance dans les composantes longitudinales et latérales et la diminution pour la composante verticale. Cet effet est typique de tous les autres signaux.

Les corrélations croisées entre les séries d'ADV et du PC-ADP après le changement de coordonnées sont présentées au tableau 3.6. Les corrélations sont toujours plus faibles dans le système de coordonnées cartésiennes que pour la composante  $v_1$  des vitesses radiales (voir tableau 3.1). La composante latérale est la composante de l'écoulement la plus affectée par le changement de coordonnées. Les corrélations entre les deux séries sont plus fortes pour la composante verticale que pour la composante longitudinale. Ceci reflète le fait que la composante verticale est celle qui est le plus directement mesurée par le PC-ADP puisque ses faisceaux sont inclinés à  $15^\circ$  par rapport à la verticale.

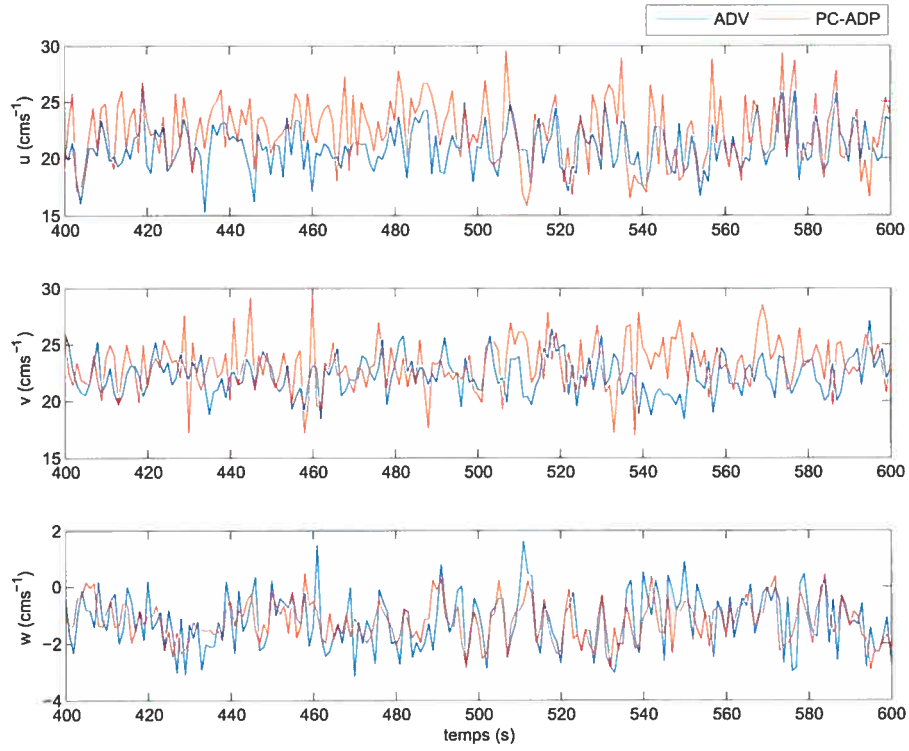


Figure 3.8 – Comparaison des vitesses en coordonnées cartésiennes après le changement de coordonnées des vitesses mesurées par le PC-ADP et l'ADV le 13 juillet dans la cellule 2.

	13/07			20/07	25/07
	cellule 2	cellule 4	cellule 6	cellule 6	cellule 6
$r_u$	0.46	0.40	0.43	0.42	0.54
$r_v$	0.11	0.12	0.06	0.11	0.23
$r_w$	0.52	0.33	0.47	0.53	0.30

Tableau 3.6 – Corrélations croisées des séries temporelles des fluctuations de vitesses mesurées par le PC-ADP et l'ADV après le changement de coordonnées.

### 3.3.4.1 Analyse par ondelettes

L'analyse par ondelettes permettra de visualiser l'effet du changement de coordonnées sur la mesure des différentes structures turbulentes de l'écoulement. Les figures 3.9 et 3.10 présentent deux exemples de spectres d'énergie locale par les transformées en ondelettes de la vitesse radiale du faisceau 1 mesurée par le PC-

ADP et l'ADV (13 et 20 juillet cellule 6).

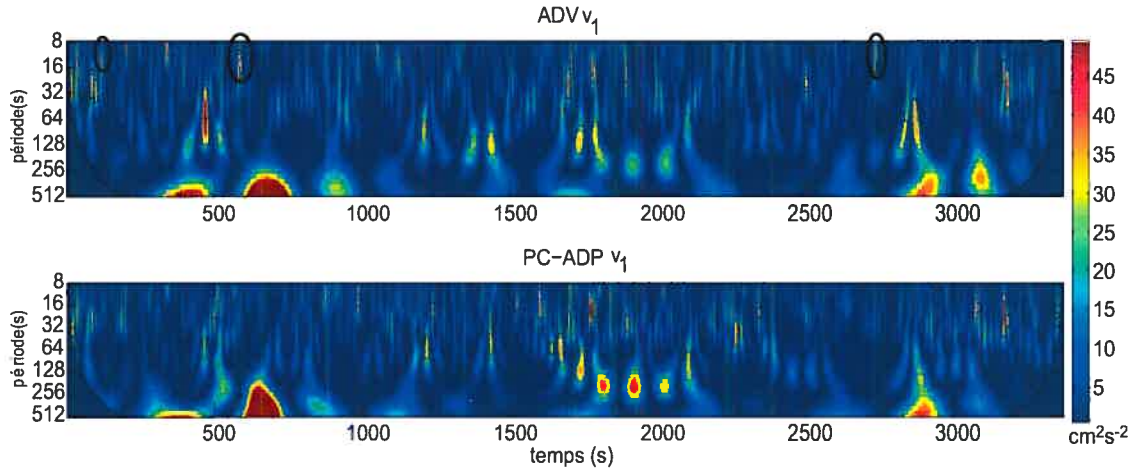


Figure 3.9 – Spectre d'énergie en utilisant les ondelettes *Mexican Hat* de  $v_1$  mesurée par le PC-ADP et l'ADV (13 juillet cellule 6). Les structures encerclées captées par l'ADV ne le sont pas par le PC-ADP.

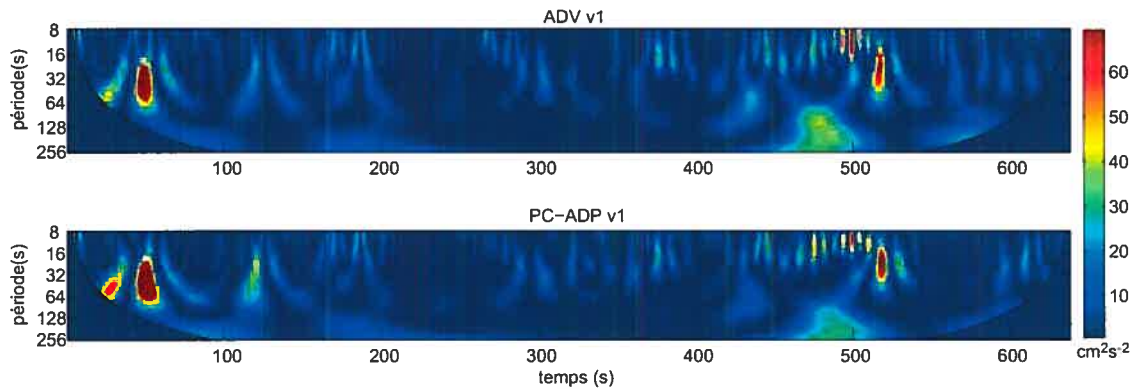


Figure 3.10 – Spectre d'énergie en utilisant les ondelettes *Mexican Hat* de  $v_1$  mesurée par le PC-ADP et l'ADV (13 juillet cellule 6).

Les échelles analysées ont été choisies en suivant les recommandations de Torrence et Compo (1998) à partir du nombre de données de la série et du pas de temps, qui est dans notre cas de une seconde. Cependant, pour éviter que les données aux extrémités de la série temporelle contaminent les analyses, nous avons donné une valeur nulle aux énergies à l'extérieur du cône d'influence. Cette zone principalement dans les plus grandes échelles est donc caractérisée par des énergies nulles

sur la figure 3.9. Les spectres présentés ici sont ceux des mesures de PC-ADP et d'ADV dont les séries temporelles de fluctuations de vitesses avaient la corrélations croisées les plus élevée ( 20 juillet,  $r = 0.78$ ) et les plus faibles (13 juillet,  $r = 0.47$ ). Pour les deux séries de mesures, l'accord est généralement bon et les instruments semblent capter les structures de mêmes périodes en même temps. Dans la série du 13 juillet, certaines structures de périodes de 8 à 16 secondes captées par l'ADV ne se retrouvent pas dans le spectre des mesures du PC-ADP.

Un spectre global peut également être obtenu en estimant la moyenne temporelle de l'énergie à chaque échelle (période) de la série temporelle. Ce spectre global, qui est équivalent à un spectre d'énergie obtenu par les transformées de Fourier lissées, permet de mesurer la contribution des structures de différentes échelles à la variance du signal. Pour estimer le spectre d'énergie global, nous avons calculé le spectre local d'énergie en utilisant les ondelettes *Morlet*, et à partir de celui-ci, nous avons estimé la moyenne temporelle à chaque échelle.

La figure 3.11 illustre la comparaison entre la composante  $v_1$  mesurée par l'ADV et par le PC-ADP. Les spectres globaux des signaux où la corrélation entre les mesures des deux instruments est plus forte (les cellules 2 et 4 des mesures du 13 juillet et celle de la cellule 6 du 20 juillet) se superposent et semblent capter les structures de même fréquence. Ces mesures ont été réalisées dans des écoulements de  $\bar{u} = 30\text{cms}^{-1}$  et de  $\bar{u} = 45\text{cms}^{-1}$ . Pour les mesures du 25 juillet, à des vitesses plus élevées ( $\bar{u} = 70\text{cms}^{-1}$ ), on retrouve les pics d'énergie aux mêmes fréquences pour les deux appareils mais leur intensité est différente. Pour les fréquences supérieures à 0.1 Hz, l'énergie contenue dans les spectres globaux du PC-ADP est toujours inférieure à celle mesurée par l'ADV, comme nous l'avons observé avec les spectres d'énergie réalisés à partir des transformées de Fourier dans la section 3.3.2. Les spectres globaux des mesures de PC-ADP et d'ADV qui avaient des corrélations croisées plus faibles (13 et 25 juillet pour la cellule 6) sont ceux qui présentent les différences les plus importantes entre les deux instruments.

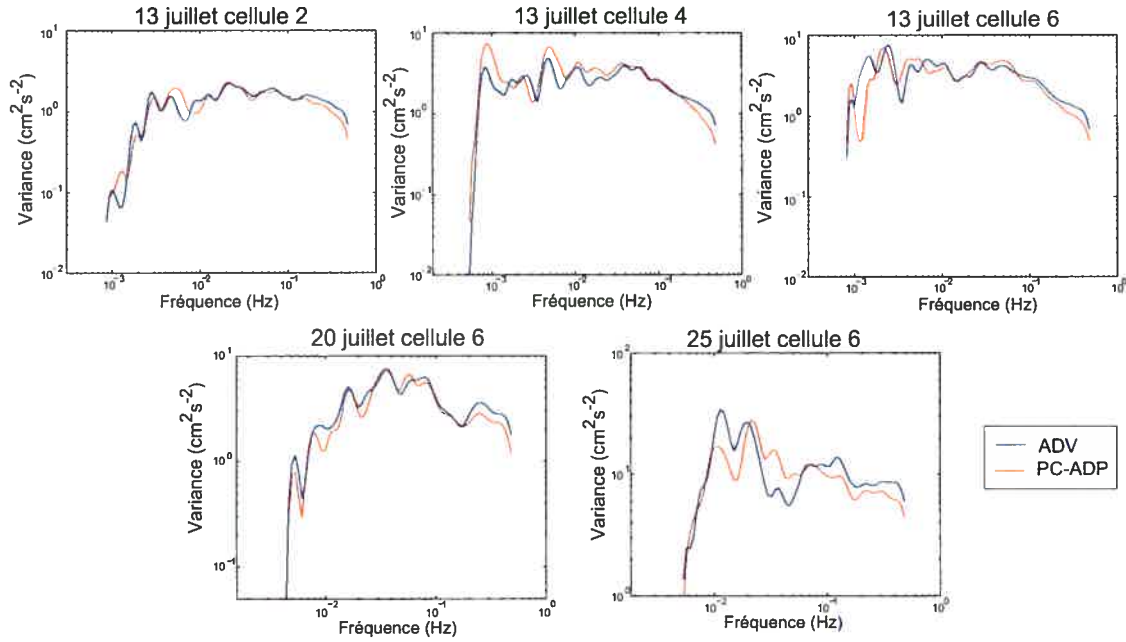


Figure 3.11 – Spectres d'énergie globale de la vitesse radiale,  $v_1$ , (ondelettes *Morlet*) des mesures de PC-ADP et d'ADV recueillies le 13 juillet ( $\bar{u} = 30 \text{ cm s}^{-1}$ ), 20 juillet ( $\bar{u} = 45 \text{ cm s}^{-1}$ ) et 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$ ).

Cette même analyse est effectuée pour les composantes longitudinale et verticale de la vitesse pour évaluer l'effet du changement de coordonnées. Comme nous l'avons observé dans la section 3.3.4, la variance des mesures du PC-ADP est supérieure à celle des mesures d'ADV pour la composante longitudinale. Le spectre global des transformées en ondelettes *Morlet* montre cet effet du changement de coordonnées sur les mesures du PC-ADP (figure 3.12). L'énergie contenue dans les spectres globaux de la composante longitudinale mesurée par le PC-ADP est supérieure à celle mesurée par l'ADV pour toutes les fréquences. L'ajout de variance est plus marquée dans les mesures à plus haute vitesse, soit celles du 25 juillet. En général, dans les plus basses fréquences, inférieures à 0.1 Hz, les structures détectées par le PC-ADP sont les mêmes que celles détectées par l'ADV mais leur énergie est amplifiée. Dans la plage de fréquences supérieures à 0.1 Hz, étant donné que la variance des vitesses radiales mesurées par le PC-ADP était inférieure à celle obtenues des mesures par l'ADV, la situation devrait être la même pour la

composante longitudinale obtenue par la combinaison des vitesses radiales. Dans cette plage de fréquences, nous nous attendions à ce que la variance des vitesses longitudinales mesurées par le PC-ADP soit inférieure à celle mesurée par l'ADV, puisque le PC-ADP avec son plus grand volume d'échantillonnage est moins sensible que l'ADV aux petites structures. Cependant, l'effet contraire est observé dans les spectres de la vitesse longitudinale de la figure 3.12. De plus, le PC-ADP détecte des structures qui n'étaient pas présentes dans la série de vitesses radiales dans les fréquences supérieures à 0.1 Hz. Dans les données du 20 juillet, on observe un pic à 0.2 – 0.3 Hz qui n'est pas présent dans le spectre de l'ADV. L'ajout de variance dans la composante longitudinale de la vitesse mesurée par le PC-ADP permet donc de mesurer la distribution de la variance dans les plus basses fréquences mais, dans les fréquences supérieures à 0.1 Hz, les spectres sont contaminés par le bruit ajouté par le changement de coordonnées.

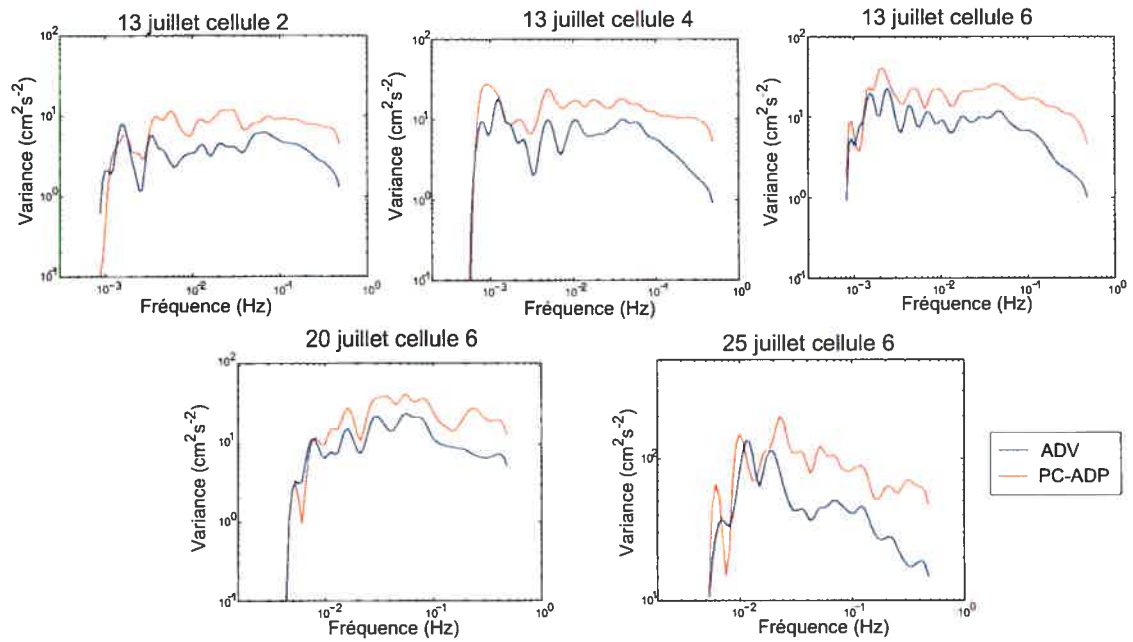


Figure 3.12 – Spectres d'énergie globale de la vitesse longitudinale,  $u$ , (ondelettes *Morlet*) des mesures de PC-ADP et d'ADV recueillies le 13 juillet ( $\bar{u} = 30 \text{ cm s}^{-1}$ ), 20 juillet ( $\bar{u} = 45 \text{ cm s}^{-1}$ ) et 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$ ).



Les spectres globaux de la composante de vitesse verticale mesurée par les deux instruments sont présentés dans la figure 3.13. L'énergie de la composante verticale mesurée par le PC-ADP est moins élevée que celle mesurée par l'ADV, comme ce que l'on a observé dans la section 3.3.4. Cette perte de variance semble s'accroître avec la vitesse moyenne de l'écoulement, puisque la différence entre les deux instruments est plus importante pour les mesures du 25 juillet à  $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$ . Les spectres qui détectent les pics d'énergie aux mêmes fréquences sont ceux où les coefficients de corrélation croisée entre les mesures de vitesses verticales des deux instruments sont les plus élevés, donc pour les données recueillies le 13 juillet dans la cellule 2 et le 20 juillet dans la cellule 6. Comme pour la composante radiale, on observe une perte d'énergie à des fréquences supérieures à 0.1 Hz. Les spectres de la composante verticale se rapprochent davantage de ceux estimés à partir de la vitesse radiale.

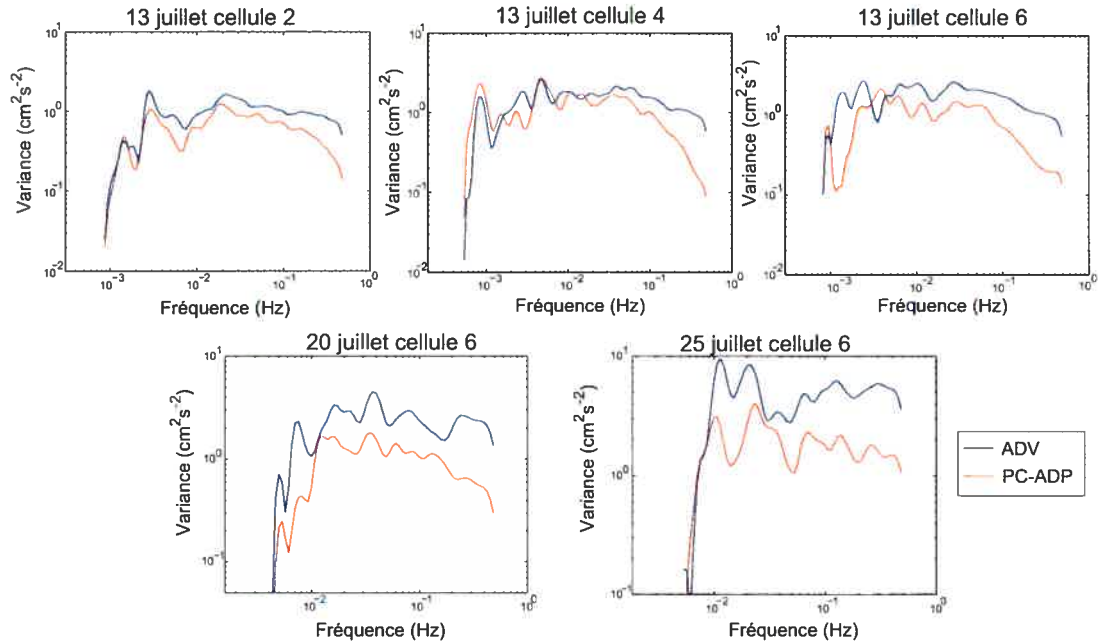


Figure 3.13 – Spectres d'énergie globale de la vitesse verticale,  $w$ , (ondelettes *Morlet*) des mesures de PC-ADP et d'ADV recueillies le 13 juillet ( $\bar{u} = 30 \text{ cm s}^{-1}$ ), 20 juillet ( $\bar{u} = 45 \text{ cm s}^{-1}$ ) et 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$ ).

### 3.4 Comparaison des vitesses cartésiennes

Pour la comparaison des vitesses cartésiennes, les mesures d'ADV sont effectuées à une distance fixe de 30 cm vers l'aval du PC-ADP (voir section 2.4.1) et à quatre hauteurs au-dessus du lit correspondant aux cellules 2, 4, 6 et 8. Les vitesses mesurées par l'ADV, filtrées et ré-échantillonnées à 1 Hz, et par le PC-ADP ont subi une rotation pour obtenir des valeurs de 0 pour les moyennes des composantes verticale et latérale. Nous avons conservé des sections temporelles de 15 minutes des vitesses mesurées par les deux instruments. La stationnarité des séries a été testée par le *run test*. Les mesures de vitesses du PC-ADP dans les cellules 6 et 8 du 20 juillet ont été exclues de l'analyse puisque leurs pourcentages de corrélation ( $< 25\%$ ) indiquaient qu'elles étaient très affectées par l'interférence entre les impulsions. Toutes les autres mesures ont des pourcentages de corrélation supérieurs à 40 % et des rapports signal-à-bruit (SNR) entre 40 et 60 dB.

La différence entre les moyennes des trois composantes de vitesses mesurées par les deux appareils est illustrée à la figure 3.14. Pour les composantes latérale et verticale la différence est négligeable, étant inférieure à  $0.05 \text{ cm s}^{-1}$ . Pour la vitesse longitudinale, la différence entre les moyennes obtenues par les deux appareils varie de 0 à  $3 \text{ cm s}^{-1}$ , ce qui correspond, en moyenne à 3% de la valeur mesurée par l'ADV. Les différences sont cependant plus importantes dans l'écoulement à  $70 \text{ cm s}^{-1}$ .

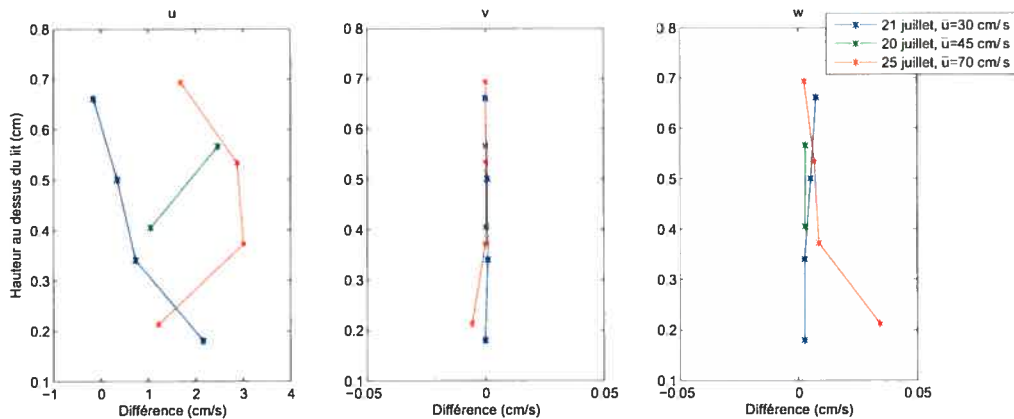


Figure 3.14 – Différence entre la vitesse moyenne mesurée par le PC-ADP et par l'ADV pour les trois composantes de vitesse.

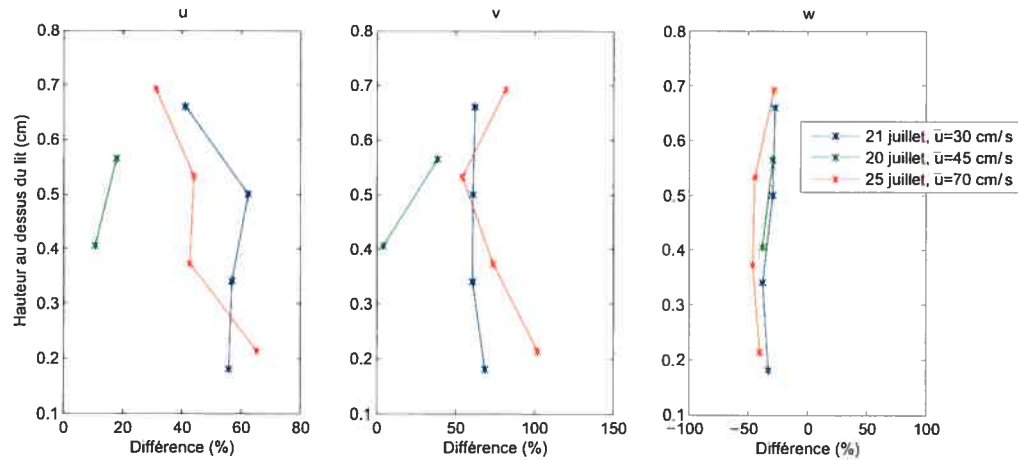


Figure 3.15 – Différence en % entre l'écart-type des vitesses obtenu par le PC-ADP et par l'ADV pour les vitesses des trois composantes de l'écoulement.

Même si la vitesse moyenne mesurée par le PC-ADP se rapproche beaucoup de celle mesurée par l'ADV, on constate qu'il y a des différences importantes dans l'ampleur des fluctuations de vitesses mesurées par les deux appareils. La comparaison de l'écart-type des vitesses dans la figure 3.15 appuie les résultats de la section précédente (3.3). Le PC-ADP donne des valeurs d'écart-type plus élevées à celles obtenues pour les vitesses mesurées par l'ADV pour la composante longitudinale. La différence peut atteindre 60%. L'écart-type des mesures du PC-ADP est supérieur à celui mesuré par l'ADV pour la composante latérale mais inférieur pour la composante verticale. Pour ces deux composantes la différence atteint respectivement 100% et -40%.

### 3.4.1 Spectres d'énergie

Les spectres d'énergie obtenus des mesures du PC-ADP et de l'ADV reflètent l'effet du changement de coordonnées observé précédemment, qui augmente l'ampleur des fluctuations pour les composantes longitudinale et latérale mais la diminue pour la composante verticale. Les spectres d'énergie mesurés par le PC-ADP et l'ADV dans des écoulements de 30 et 70  $\text{cm s}^{-1}$  sont illustrés à la figure 3.16.

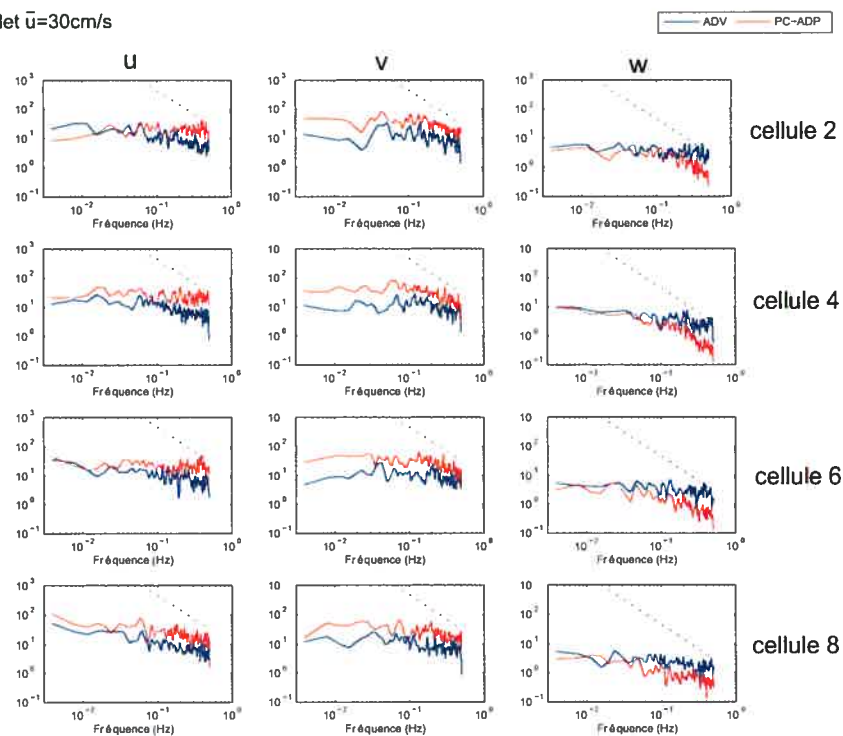
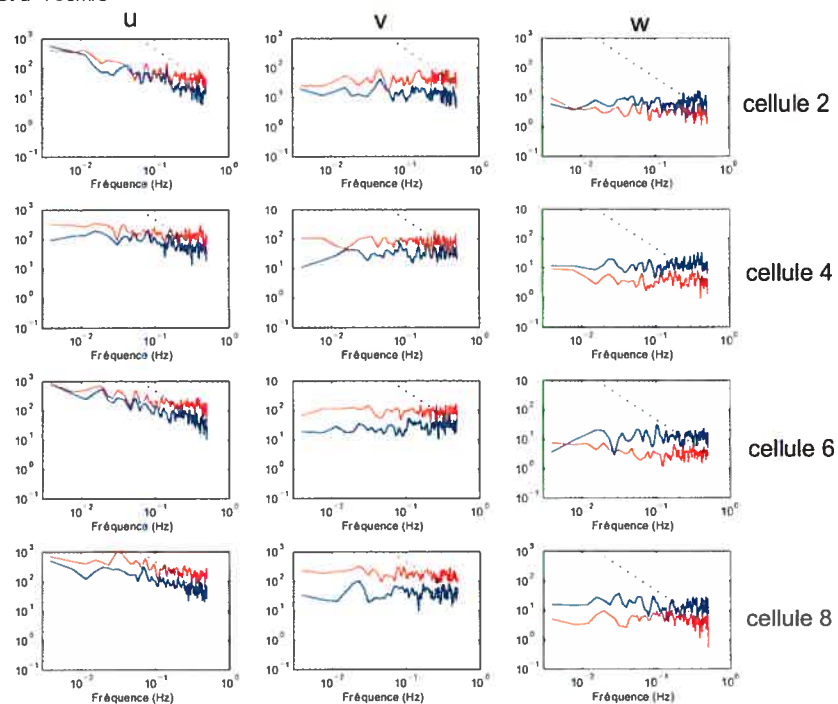
21 juillet  $\bar{u}=30\text{cm/s}$ 25 juillet  $\bar{u}=70\text{cm/s}$ 

Figure 3.16 – Exemple de spectres d'énergie. La ligne pointillée indique la pente de  $-5/3$ .

La figure 3.16 nous indique que le spectre des séries de vitesses du PC-ADP contient plus d'énergie pour les composantes longitudinale et latérale et moins d'énergie pour la composante verticale que celui des vitesses mesurés à l'aide de l'ADV. En général, même si les spectres d'énergie des mesures de PC-ADP sont décalés vers les plus hautes énergies, les deux instruments arrivent à mesurer des pics d'énergie semblables. Puisque la fréquence de Nyquist pour ces mesures est de 0.5 Hz, il n'est pas possible de mesurer le *inertial subrange* caractérisé par une pente de fréquence de  $-5/3$  dans les fréquences plus élevées. Les spectres où l'énergie décroît dans la plage de fréquence supérieure à 0.1 Hz, sont ceux des vitesses verticale et latérale du PC-ADP mesurées le 13 juillet dans un écoulement de  $30 \text{ cms}^{-1}$ . La composante longitudinale mesurée par l'ADV des mesures du 13 juillet présente le début d'une décroissance dans les fréquences les plus élevées du spectre, mais le spectre mesuré par le PC-ADP reste constant. Les spectres des vitesses verticale et latérale mesurées le 25 juillet sont plats, peu importe le type d'instrument utilisé. Les échelles sondées par les instruments dans cet écoulement de  $70 \text{ cms}^{-1}$  et de 97 cm de profondeur, correspondent aux grandes structures turbulentes et sont généralement caractérisée par un spectre d'énergie plat (voir figure 1.1). Afin de caractériser la zones intermédiaire et le *inertial subrange*, une fréquence d'échantillonnage supérieure à 1 Hz aurait été nécessaire.

### 3.4.2 Énergie cinétique turbulente

L'énergie cinétique turbulente,  $\overline{q^2} \equiv \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}$ , représente l'énergie contenue dans les fluctuations de vitesses. Les estimations de l'énergie cinétique turbulente sont présentées à la figure 3.17. Le PC-ADP donne clairement des quantités supérieures à celles de l'ADV. Ceci est lié à la différence déjà établie entre les écart-types des séries de vitesses, notamment sur les composantes longitudinales et latérales. Le changement de coordonnées entraîne une augmentation considérable de l'énergie cinétique turbulente mesurée par le PC-ADP.

Les différences marquées peuvent être liées à la proportion de bruit dans le signal. Par exemple, la mesure dans la cellule 8 (à 21 cm du lit) des données du 25

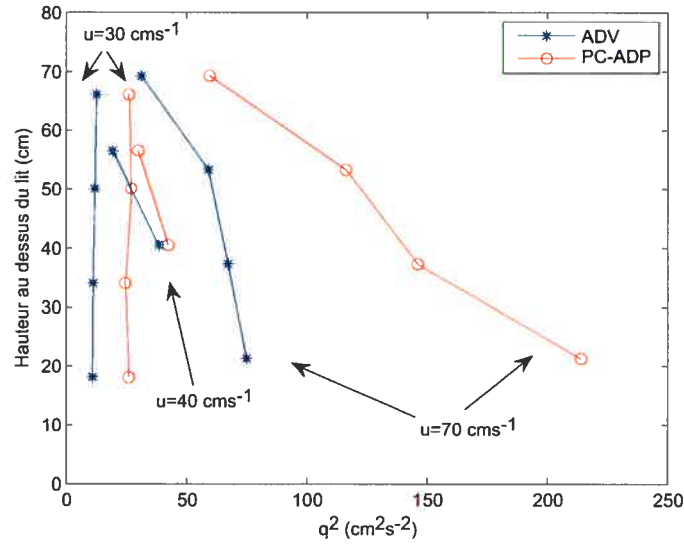


Figure 3.17 – Comparaison de l'énergie cinétique turbulente estimée à partir des mesures de PC-ADP et d'ADV pour trois environnements de vitesses moyennes différentes.

juillet à  $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$  correspond à une mesure où le pourcentage de corrélation est plus faible (40%). Cette mesure de vitesse comporte une plus grande proportion de bruit, ce qui fait augmenter la variance dans les trois composantes de la vitesse en coordonnées cartésiennes. De plus, situé près du lit dans un l'écoulement fortement hétérogène, le bruit ajouté par le changement de coordonnées est plus grand.

Sachant que les fluctuations radiales mesurées par le PC-ADP correspondent plus exactement aux vitesses de l'écoulement, nous pouvons estimer l'énergie cinétique se retrouvant dans les vitesses dans le système de coordonnées radiales,  $\overline{q^2_{rad}} \equiv \overline{v_1^2} + \overline{v_2^2} + \overline{v_3^2}$  (voir figure 3.18).

On peut exprimer l'énergie cinétique turbulente radiale d'une autre façon, en remplaçant les vitesses  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  par leur équivalent en coordonnées cartésiennes. Puisque

$$v_1 = \sin \theta u - \cos \theta w \quad (3.5)$$

$$v_2 = \cos \phi \sin \theta u + \sin \phi \sin \theta v - \cos \theta w \quad (3.6)$$

$$v_3 = \cos \phi \sin \theta u - \sin \phi \sin \theta v - \cos \theta w \quad (3.7)$$

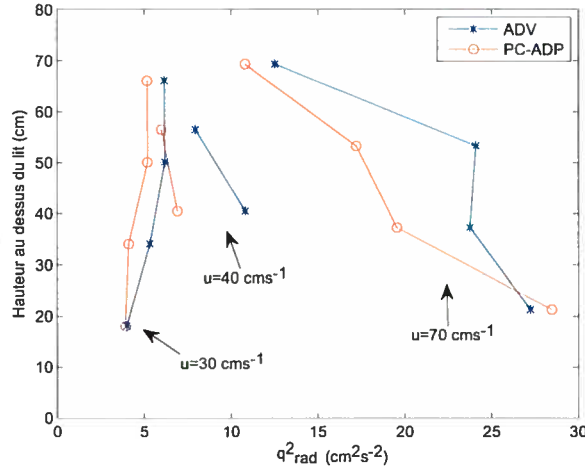


Figure 3.18 – Comparaison de l'énergie cinétique turbulente des vitesses en coordonnées radiales estimée à partir des mesures de PC-ADP et d'ADV.

$\overline{q^2_{rad}}$  en terme des vitesses longitudinale, latérale et verticale pour le PC-ADP à trois faisceaux (avec  $\theta = 15^\circ$  et  $\phi = 60^\circ$ ) devient

$$\overline{q^2_{rad}} = 0.101\overline{u'^2} + 0.101\overline{v'^2} + 2.80\overline{w'^2} - \overline{u'w'}. \quad (3.8)$$

Cette quantité représente alors une somme pondérée des trois cisaillements normaux et du cisaillement de Reynolds dans le plan xz. L'énergie cinétique turbulente des vitesses radiales concorde davantage avec celle estimée à partir des mesures d'ADV puisqu'elle ne fait pas intervenir le changement de coordonnées. Le PC-ADP donne des mesures plus faibles de  $q^2_{rad}$  que l'ADV à cause de son plus grand volume d'échantillonnage. Les différences entre l'énergie cinétique turbulente des vitesses en coordonnées cartésiennes mesurées par le PC-ADP et l'ADV varient de 50 à 200%, tandis que l'énergie cinétique des vitesses radiales est beaucoup plus faible, allant de 0 à 25%.

### 3.4.3 Cisaillements de Reynolds

La corrélation  $\overline{u'w'}$  est une mesure du cisaillement de Reynolds des composantes longitudinale et verticale dans l'écoulement, ce qui correspond à l'échange de momentum dans le plan xz. Lorsque  $-\overline{u'w'}$  est positif, nous sommes en présence d'une vitesse longitudinale positive associée une vitesse verticale négative ou d'une vitesse longitudinale négative associée à une vitesse verticale positive. Les valeurs de ce cisaillement estimées par le PC-ADP et l'ADV sont comparées à la figure 3.19.

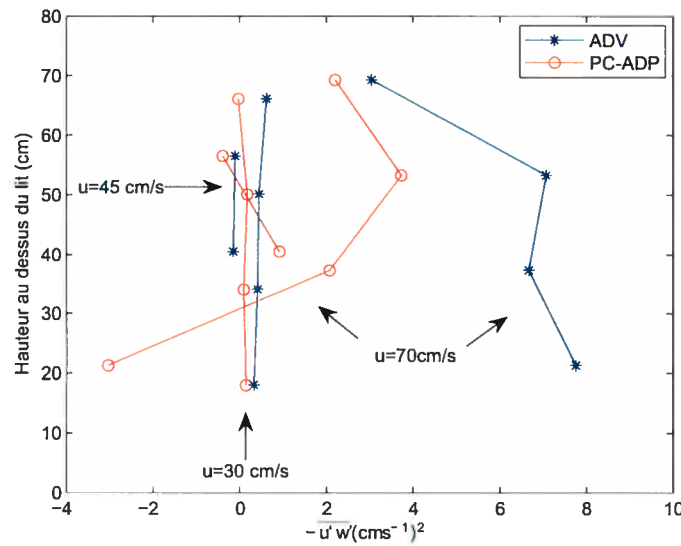


Figure 3.19 – Cisaillements de Reynolds,  $-\overline{u'w'}$ , mesurés par le PC-ADP et l'ADV dans les trois environnements.

Le PC-ADP a tendance à donner des valeurs plus faibles de  $-\overline{u'w'}$  par rapport à l'ADV. Comme nous l'avons montré plus tôt, le changement de coordonnées ajoute un bruit important dans la composante longitudinale des vitesses, tout en entraînant une diminution de la variance dans la composante verticale. Ce bruit cause une diminution de la corrélation entre ces deux séries de vitesses. Les mesures de vitesses du 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ) du faisceau 3 du PC-ADP à 21 cm au dessus du lit donnent une corrélation plus faible, ce qui produit des cisaillements de Reynolds très différents et de signe opposé à ceux obtenus par l'ADV. Cette mauvaise estimation s'explique en comparant les fluctuations de vitesses longitudinales et



verticales mesurées par les deux instruments (figure 3.20).

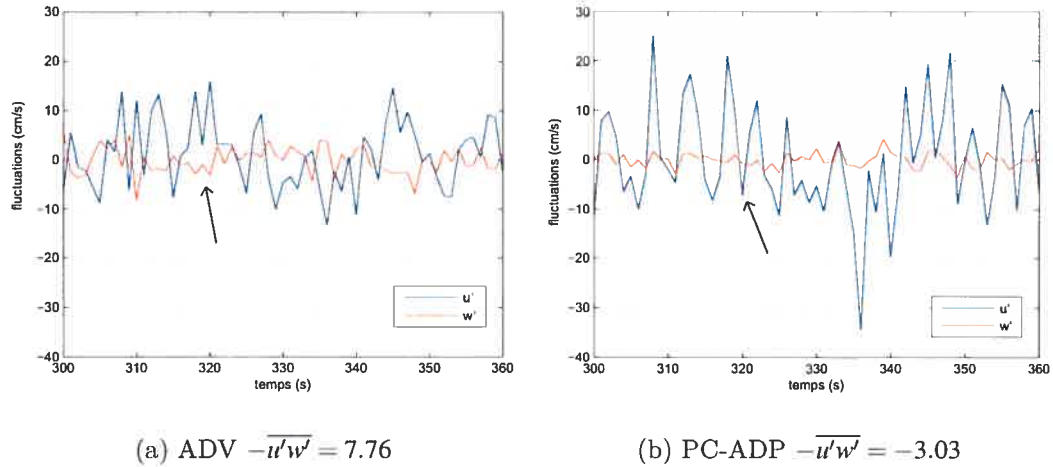


Figure 3.20 – Fluctuations de vitesse longitudinale et verticale mesurées par (a) l'ADV et (b) le PC-ADP pour les mesures de vitesses du 25 juillet ( $\bar{u} = 70 \text{ cm s}^{-1}$ ) du faisceau 3 du PC-ADP à 21 cm au dessus du lit. Les cisaillements de Reynolds,  $-\overline{u'w'}$ , estimés à l'aide des deux instruments sont très différents. Les flèches indiquent un temps où les cisaillements instantanés sont de signes opposés.

Puisque le bruit associé au changement de coordonnées augmente la variance dans la composante longitudinale et la diminue dans la composante verticale, les instants où ces deux composantes sont de signes opposés s'en trouvent diminués. Lorsque l'ADV mesure une vitesse  $u'$  positive et une vitesse  $w'$  négative, par exemple au temps 320 s, la valeur de  $w'$  mesurée par le PC-ADP est très près de zéro mais négative et la composante  $u'$  est de signe opposée à celle mesurée par l'ADV. L'ADV, dans cet exemple de la figure 3.20, mesure des vitesses où  $u'$  et  $w'$  s'opposent généralement, tandis que  $u'$  et  $w'$  mesurés par le PC-ADP sont généralement du même signe. Cet exemple provient d'un écoulement rapide près du lit où la rugosité est plus importante due à la présence de dunes. À l'intérieur d'un volume d'une longueur d'une vingtaine de centimètres, soit la distance entre les faisceaux, l'écoulement n'est pas homogène, ce qui met en doute la validité du changement de coordonnées.

### 3.5 Conclusions et recommandations

L'objectif principal de ce chapitre était de déterminer si le PC-ADP peut être utilisé pour des mesures de vitesses et de quantités turbulentes en rivière peu profonde. À la lumière des résultats obtenus, nous tirons des conclusions qui nous serviront dans l'analyse des résultats du chapitre suivant. Ensuite, à partir de ces conclusions, découleront quelques recommandations sur l'utilisation du PC-ADP en rivière peu profonde.

L'algorithme de résolution des ambiguïtés de Lacy et Sherwood (2004) que nous avons modifié détecte et corrige les erreurs d'ambiguïtés des séries de vitesses du PC-ADP, ce qui permet d'effectuer des mesures des écoulements allant jusqu'à  $70 \text{ cm s}^{-1}$ . Cet algorithme a résolu les ambiguïtés d'une mesure dans un écoulement rapide dans une rivière à lit sablonneux en présence de dunes.

Les vitesses radiales, parallèles aux faisceaux, sont adéquatement mesurées par le PC-ADP. Les distributions des fluctuations, moments et spectres d'énergie de  $v_1$  mesurées par le PC-ADP concordent bien avec celles estimées à partir des mesures d'ADV à 1 Hz. Nous pouvons généraliser cette conclusion aux deux autres composantes de vitesse radiale,  $v_2$  et  $v_3$ , qui sont mesurées de la même façon par le PC-ADP.

La variance dans les mesures de vitesses radiales du PC-ADP est plus faible que celle des mesures d'ADV, ce qui est attribuable à l'effet du plus grand volume d'échantillonnage du PC-ADP. Pour la comparaison avec l'ADV, nous avons utilisé des hauteurs de cellules de 8 à 9 cm avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz, utilisant ainsi de 12 à 15 échantillons de vitesses par mesure. Des tailles de cellules plus petites réduisent le volume d'échantillonnage et le nombre d'échantillons utilisés pour la mesure de la vitesse.

Les vitesses moyennes dans le système de coordonnées cartésiennes sont adéquatement mesurées par le PC-ADP. L'erreur sur la mesure de la vitesse moyenne longitudinale est de 3%. Les profils logarithmiques de vitesses moyennes pourraient

donc être utilisés afin de déterminer la vitesse de cisaillement,  $u_L^*$  et la rugosité,  $z_0$ , dans les écoulements en rivière peu profonde.

Le changement de coordonnées des vitesses radiales vers les vitesses cartésiennes dans un écoulement non homogène introduit du bruit additionnel dans les mesures. La variance des composantes longitudinale et latérale augmente et celle de la composante verticale diminue. Ces résultats concordent avec ceux obtenus en laboratoire par Nystrom (2001) qui avait comparé un ADP cohérent de 1.5 MHz à 3 faisceaux inclinés de  $25^\circ$  par rapport à la verticale avec un ADV. Cet effet semble s'accroître avec la distance par rapport à l'appareil, donc avec la distance entre les faisceaux. De plus, près du lit, lorsque la rugosité est importante, l'ajout de bruit est plus grand puisque l'écoulement y est moins homogène.

L'énergie cinétique turbulente est surestimée par cet ajout de variance causé par le changement de coordonnées dans un écoulement non homogène. La différence entre les estimés provenant des mesures du PC-ADP et de l'ADV varient de 50 à 200%. Tilston et Biron (sous presse) ont aussi observé que le PC-ADP donnait des valeurs d'énergie cinétique turbulente supérieure à celle enregistrée par l'ADV. Nous avons estimé l'énergie cinétique turbulente radiale,  $\overline{q^2}_{rad} \equiv \overline{v_1^2} + \overline{v_2^2} + \overline{v_3^2}$ , pour le PC-ADP et l'ADV. L'énergie cinétique turbulente radiale est plus faible pour le PC-ADP dans une proportion de 25%, qui peut être expliquée par le plus grand volume d'échantillonnage. Cette quantité représente une somme pondérée des cisaillements normaux et du cisaillement de Reynolds dans le plan xz.

Les cisaillements de Reynolds sont généralement sous-estimés par l'ajout du bruit causé par le changement de coordonnées. Puisque le changement de coordonnées ajoute du bruit qui augmente la variance de  $u'$  et diminue la variance de  $w'$ , la corrélation entre ces deux composantes de vitesse s'en trouvent réduite. En se rapprochant du lit, la taille du volume où l'écoulement doit être homogène pour que le changement de coordonnées soit valide s'agrandit, ce qui introduit dans les vitesses cartésiennes une plus grande proportion de bruit lors du changement de coordonnées. Lorsque les mesures sont effectuées dans un écoulement où la rugosité du lit est importante, les cisaillements de Reynolds près du lit sont fortement contaminés.

Nos recommandations sont :

- une durée d'échantillonnage d'au moins 900 secondes (15 minutes) afin d'obtenir des estimés exacts des statistiques de l'écoulement. L'erreur-type de la moyenne d'une série de 15 minutes est inférieure à 1 % et celle de l'écart-type est inférieure à 4%.
- l'utilisation d'un algorithme de résolution des ambiguïtés qui inclut préalablement un filtre de la vitesse de résolution. Ceci est nécessaire lorsque les vitesses de l'écoulement sont élevées. En corrigeant les ambiguïtés, nous augmentons la vitesse maximale qui peut être mesurée par le PC-ADP, étendant ainsi son utilisation dans des écoulements de  $70 \text{ cm s}^{-1}$  de 1 mètre et moins de profondeur.
- la taille des cellules devrait être de l'ordre de 8 à 9 *cm* dans des écoulements de 80 à 100 *cm* de profondeur. Lacy et Sherwood (2004), utilisant également un PC-ADP de Sontek, avaient fixé la taille des cellules à 10 *cm* pour réaliser des profils à l'intérieur de la couche-limite d'un écoulement dominé par des vagues. La taille minimale des cellules du PC-ADP peut atteindre 2 *cm*, mais le niveau de bruit Doppler dans les mesures de cellules de cette taille est très élevé à cause du petit nombre d'échantillons par mesure de vitesse. Par des tests, non présentés ici, qui faisaient varier la taille des cellules, nous avons évalué que, pour des profondeurs allant de 80 à 100 *cm*, des cellules de la taille de 8 à 9 *cm* constituaient un bon compromis entre le niveau de bruit dans les mesures et le nombre de cellules comprises dans le profil. De manière générale, pour une fréquence d'échantillonnage et un délai entre les impulsions donnés, le nombre et la taille des cellules doivent être choisis de façon à inclure plus de 10 échantillons de vitesses (*pings*) par mesure.
- l'utilisation de la composante verticale pour l'analyse en ondelette, les données pour cette composante étant moins affectées par le changement de coordonnées que les deux autres composantes de vitesses. L'analyse par ondelettes de la composante verticale permettra d'identifier la présence de structures

turbulentes de l'écoulement qui se propagent vers la surface ou vers le lit de la rivière. Les transformées en ondelettes de la vitesse radiale du PC-ADP permettaient de capter les mêmes structures que l'ADV. Cependant, la composante radiale du faisceau 1 du PC-ADP n'est pas une composante de vitesse généralement utilisée pour décrire l'écoulement puisqu'elle détecte des mouvements orientés à  $15^\circ$  par rapport à la verticale.

## CHAPITRE 4

### TESTS DU PC-ADP DANS LES DIFFÉRENTS MILIEUX FLUVIAUX

Dans ce chapitre, nous abordons le deuxième objectif de cette étude, soit celui d'évaluer le potentiel du PC-ADP pour mesurer la turbulence dans différents environnements fluviaux. Afin de réaliser cet objectif, le PC-ADP a été déployé dans une rivière à lit sablonneux, la rivière Rouge, et deux rivières à lit graveleux, les rivières du Nord et Eaton-Nord. Les milieux choisis décrits dans le tableau 4.1 couvrent une gamme de conditions d'écoulement (vitesse moyenne, intensité turbulente) et de rugosité. La localisation de ces sites est présentée au chapitre 2 (figures 2.8, 2.9 et 2.10).

Écoulement	Résistance	Site	Z	$\bar{u}$	$u_{int}$	$u_L^*$
Uniforme	Rides	R2106-1	70	32	5	2.8
		R1307	107	32	3	2.3
		R2107	95	28	3	0.9†
	Dunes	R2007	85	45	3	4
		R2507	98	70	7	5
	Dunes mobiles	R0208	30	60	13	n/d
Séparation horizontale	Banc d'accumulation	R1705	92	15	n/d	n/d
		R2106-2	80	6	n/d	n/d
		R0707	72	5	n/d	n/d
		R2809	60	7	n/d	n/d
Accélération/ décélération	Mouille	E0610-1	84	10	7	n/d
		E0610-2	93	20	8	6
		E0610-3	102	20	7	3
		E0610-4	101	20	7	2.9
Séparation verticale	Forte rugosité	N2508-1	65	10	8	4
		N2508-2	65	10	8	4

Tableau 4.1 – Milieux fluviaux où le PC-ADP a été déployé pour cette étude. Z est la profondeur d'eau sous l'appareil (en cm),  $\bar{u}$  est la vitesse moyenne de l'écoulement,  $u_{int}$ , l'intensité turbulente et  $u_L^*$  la vitesse de cisaillement (en  $\text{cm s}^{-1}$ ). † : valeurs obtenues à partir de vitesses de mauvaise qualité. n/d : données non-disponibles.

Tout d'abord, nous présenterons en détail quelques exemples de mesures obtenues dans les divers milieux. Ensuite, suivront une synthèse concernant l'estimation de la vitesse de cisaillement et de la rugosité ainsi qu'une comparaison des profils normalisés d'énergie cinétique turbulente et de cisaillements de Reynolds pour l'ensemble des environnements testés. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous analyserons un cas particulier qui n'aura pas été inclus dans la comparaison, soit une séquence de mesures de PC-ADP, qui a été recueillie dans un environnement caractérisé par des dunes mobiles. Cette dernière section permettra de voir si le PC-ADP peut mesurer dans des écoulements non stationnaires où le lit est mobile. Les résultats obtenus seront comparés à ceux d'autres études afin de vérifier si les mesures du PC-ADP au dessus de dunes concordent avec celles déjà publiées dans la littérature.

#### 4.1 Présentation des sites d'études

La performance du PC-ADP a été testée dans plusieurs environnements fluviaux de trois rivières différentes. Nous avons recueilli des séries temporelles de plus de 15 minutes et les ambiguïtés ont été résolues à l'aide de l'algorithme décrit à la section 2.5.2. La stationnarité des séries temporelles a été testée avec le *run test*. Les vitesses mesurées sur un profil ont subi une rotation dans le plan horizontal afin que la vitesse moyenne de la composante latérale de l'écoulement soit nulle. Afin de garder les mesures de vitesses du profil vertical dans le même cadre de référence, le même angle de rotation a été utilisé pour toutes les cellules. La distance entre le lit et l'appareil est mesurée au début des séries temporelles par chacun des faisceaux du PC-ADP avec une précision de  $\pm 1$  cm (Lacy et Sherwood, 2004). La profondeur de l'écoulement correspond à la moyenne des mesures des trois faisceaux. La démarche utilisée sera illustrée à l'aide de quelques profils.

#### 4.1.1 Écoulement uniforme avec rides

La série R1307 est un exemple de mesures dans un écoulement uniforme sur un lit sablonneux en présence de rides (figure 4.1). La hauteur des rides est d'environ 2 cm sur un lit composé de sable grossier, d'une taille médiane de 0.23 mm. La série a une durée de plus de 60 minutes. La profondeur mesurée par les faisceaux 1, 2 et 3 est respectivement de 116, 102 et 106 cm. La cellule 10 a été retirée des analyses puisqu'elle inclut une partie du lit (voir Figure 4.1). Les mesures du faisceau 2 dans la cellule 9 sont décorréélées par l'interférence avec les impulsions. La corrélation est inférieure à 25% et cette mesure a aussi été rejetée des analyses subséquentes. La première cellule qui se trouve à 10 cm de l'émetteur est affectée par la présence de l'appareil qui modifie l'écoulement. La vitesse verticale  $y$  est négative et le pourcentage de corrélation des mesures est plus faible ( $< 25\%$ ). Les mesures de cette cellule doivent être également rejetées.

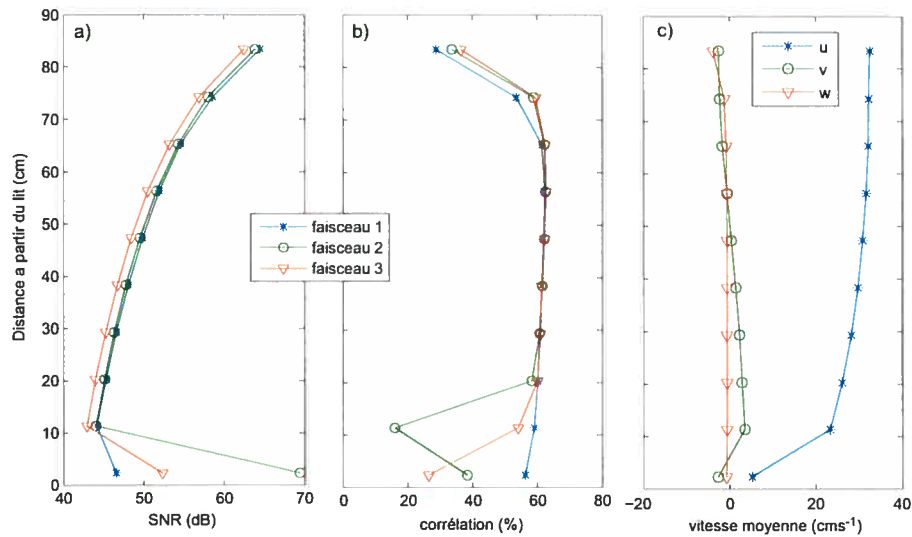


Figure 4.1 – Profil des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série R1307 dans un écoulement uniforme au dessus de rides ( $\bar{u} = 32 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 107 \text{ cm}$ ). Nous avons fixé les paramètres du PC-ADP afin d'échantillonner des profils comprenant 10 cellules de 9 cm à 1 Hz. La distance maximale du profil,  $r_{\max}$ , était de 1.17 m, et 13 à 14 échantillons de vitesses étaient utilisés pour chaque mesure.



La figure 4.2a) représente un profil semi-logarithmique de la vitesse longitudinale moyenne. Pour ce profil, le logarithme de la hauteur au dessus du lit a été tracée en fonction de la vitesse longitudinale moyenne. Cependant, pour le calcul de la vitesse de cisaillement et de la rugosité, la relation inverse a été utilisée, soit  $\bar{u}$ , la variable dépendante, en fonction de  $\ln(z)$ , la variable indépendante. La pente de cette dernière relation est donc proportionnelle à la vitesse de cisaillement,  $u_L^*$ , et la rugosité,  $z_0$ , est déterminée par la relation  $\exp(-b/m)$ , où  $b$  est l'ordonnée à l'origine de la droite et  $m$  la pente (équation 1.7). L'erreur associée à l'estimation de ces valeurs a été calculée en utilisant la méthode de Wilkinson (1984). La valeur de la vitesse de cisaillement calculée à partir de ce profil est de  $2.3 \pm 0.1 \text{ cms}^{-1}$  et la rugosité est de  $2 \pm 8 \text{ mm}$ . Nous pouvons également évaluer la vitesse de cisaillement à partir du profil des cisaillements de Reynolds,  $u_R^*$ . La valeur de  $-\overline{u'w'}$  à  $z/Z = 0$ , obtenue en prolongeant la relation linéaire du profil, permet d'estimer  $u_R^{*2}$  selon la relation 1.9. La valeur de  $u_R^*$  estimée pour les mesures dans cet environnement est de  $0.80 \text{ cms}^{-1}$ .

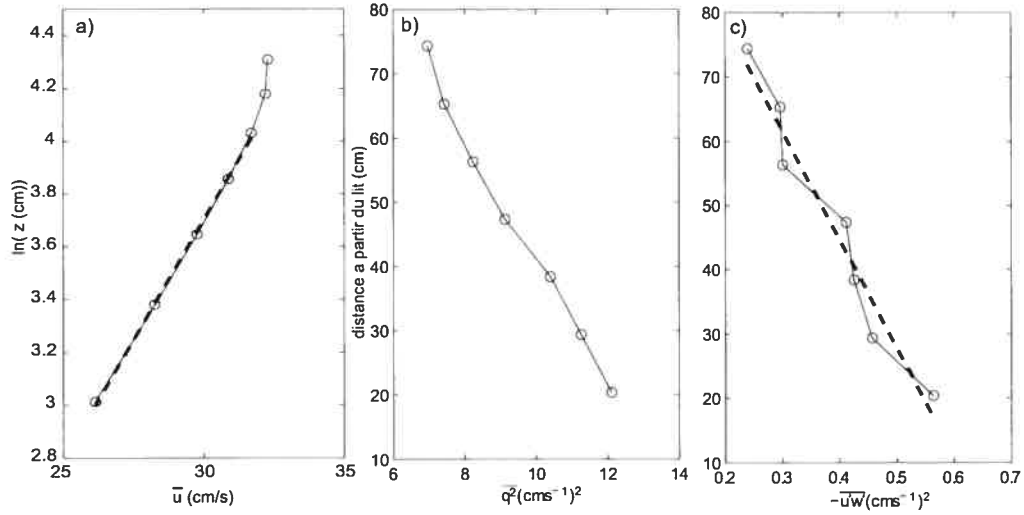


Figure 4.2 – Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R1307 dans un écoulement uniforme au dessus de rides ( $\bar{u} = 32 \text{ cms}^{-1}$ ,  $Z = 107 \text{ cm}$ ).

La portion linéaire sur le profil semi-logarithmique de la vitesse longitudinale moyenne couvre une grande portion de la tranche d'eau entre 20 et 60 *cm* du lit. Par contre, les vitesses comprises dans la région qui couvre les premiers 20% de l'écoulement près du lit n'ont pu être mesurées, car les mesures de la cellule centrée à 11 *cm*, contaminées par l'interférence entre les impulsions, ont été retirées de l'analyse. Puisque cette portion de l'écoulement n'a pu être sondée, l'erreur sur l'estimation de la vitesses de cisaillement s'accroît grandement (Biron *et al.*, 1998). Les profils d'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds ont tous deux la même forme, soit une augmentation linéaire en se rapprochant du lit. Cependant, les valeurs de cisaillements de Reynolds qui n'ont pu être mesurées dans le premier 20 % au-dessus du lit sont cruciales pour la détermination de la vitesse de cisaillement (Biron *et al.*, 2004). Dans la prochaine section, une comparaison entre les valeurs de  $u_L^*$  et  $u_R^*$  pour tous les environnements nous permettra de discuter des erreurs associées à l'estimation de la vitesse de cisaillement à partir des mesures du PC-ADP. De plus, les profils d'énergie cinétique turbulente et de cisaillement de Reynolds normalisées par la vitesse de cisaillement seront comparés aux profils théoriques attendus pour un écoulement turbulent pour chacun des environnements.

Deux autres séries de mesures ont été recueillies dans ce même type de milieu. La série R2107 ne permettait pas d'obtenir des profils de vitesses de bonne qualité. Les cellules en bas de profil sont contaminées par les interférences entre les impulsions. Aucune mesure de vitesse n'est obtenue dans les premiers 20 *cm* de la tranche d'eau de l'écoulement d'une profondeur de 95 *cm*. L'estimation des valeurs de  $u_L^*$ ,  $z_0$  et  $u_R^*$  qui nécessite des mesures de vitesse près du lit est plus difficile. Les mesures de la troisième série R2106-1 sont de meilleure qualité et ont été recueillies dans un environnement de même vitesse moyenne que la série R1307 mais d'une profondeur de 70 *cm*. Elles ne sont pas affectées par l'interférence entre les impulsions en bas de profil, ce qui permet d'obtenir des mesures de vitesses plus près du lit. Des mesures de vitesses dans des cellules de 6 *cm* de hauteur centrées à 12 et 18 *cm* du lit sont donc incluses dans les profils de vitesse moyenne, d'énergie cinétique turbulente et de cisaillements de Reynolds (figure 4.3).

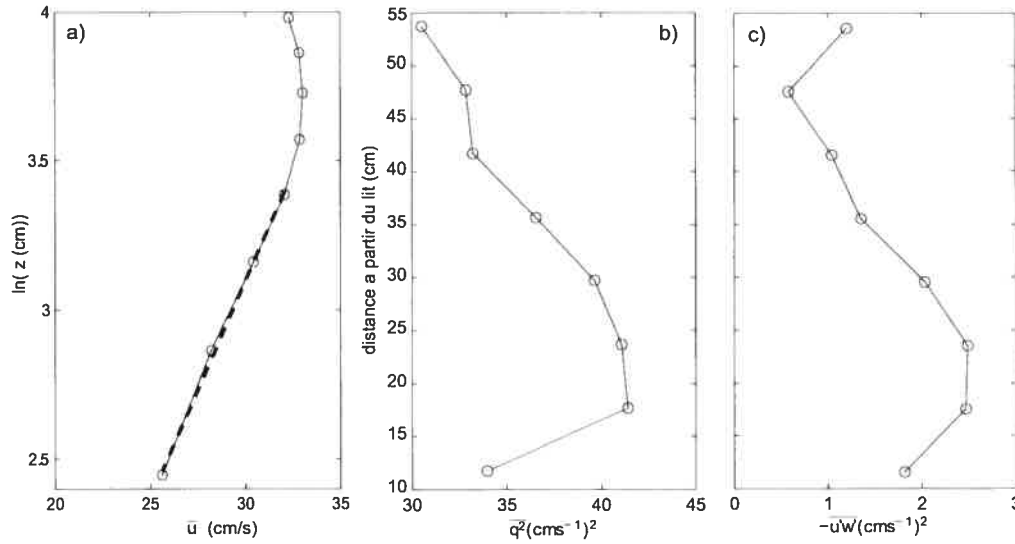


Figure 4.3 – Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R2106-1 dans un écoulement uniforme au dessus de rides ( $\bar{u} = 32 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 70 \text{ cm}$ ).

Les valeurs de  $u_L^*$  et de  $z_0$  estimées à partir des profils semi-logarithmiques de vitesses sont de  $2.8 \pm 0.4 \text{ cm s}^{-1}$  et de  $3 \pm 3 \text{ mm}$ . Dans ce cas-ci, puisque le profil des cisaillement de Reynolds n'est pas linéaire,  $u_R^*$  ne peut être estimé en extrapolant la distribution verticale jusqu'à  $z = 0$ . Lorsqu'un profil de la type est mesuré, la valeur maximale du cisaillement à  $\sim 0,1 Z$  peut être utilisé afin d'estimer la vitesse de cisaillement ( $u_R^* = \sqrt{-\overline{u'w'}}$ ) (Biron *et al.*, 2004). Pour le profil de la figure 4.3c, la valeur maximale du cisaillement de Reynolds est de  $2.5 \text{ cm}^2 \text{s}^{-2}$  à  $18 \text{ cm}$  du lit ( $z = 0.26 Z$ ), ce qui nous donne une valeur de  $u_R^*$  de  $1.6 \text{ cm s}^{-1}$ . Les deux premières cellules près de l'appareil, sont légèrement décorrélées, avec un pourcentage de corrélation de 35 à 45% comparativement à plus de 55% pour le reste du profil. La présence de l'instrument qui modifie l'écoulement cause cette diminution des valeurs de corrélation. Les valeurs estimées d'énergie turbulente et de cisaillements de Reynolds dans les deux premières cellules sont probablement affectées par cette plus faible corrélation des mesures. Les profils d'énergie cinétique turbulente et de cisaillements de Reynolds présentent une augmentation en se rapprochant du lit. Cependant, contrairement aux profils de la série de mesure R1307, on observe

une diminution de l'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds près du lit. La valeur maximale de ces deux quantités est atteinte à 18 et 24 *cm*. Les valeurs d'énergie cinétique turbulente et de cisaillements de Reynolds de cette série sont plus élevées que celles de la série R1307 même si la vitesse moyenne de l'écoulement est sensiblement la même. Ces deux séries ont été recueillies dans l'écoulement au dessus de rides d'environ 2 *cm* de hauteur, mais la profondeur de l'écoulement de la série R1307 est de 107 *cm* comparativement à 70 *cm* pour la série R2106-1.

#### 4.1.2 Écoulement uniforme avec dunes

La série R2507 est un exemple de mesures dans un écoulement uniforme sur un lit sablonneux en présence de dunes (figure 4.4). La hauteur des dunes est de 5 à 10 *cm* et le sable y est plus grossier (taille médiane de 0.32 mm) que celui du milieu caractérisé par des rides. La série a une durée d'un peu plus de 30 minutes, la vitesse moyenne de l'écoulement est de 70  $\text{cms}^{-1}$  et la profondeur, mesurée par le PC-ADP, est de 98 *cm*. Les mesures de la cellule 10 qui ont un rapport signal à bruit plus élevé à cause de la réflexion des impulsions sur le lit seront retirées des analyses subséquentes. Les cellules 7 à 9 ont des pourcentages de corrélation plus faibles, probablement contaminées par l'interférence entre les impulsions, mais seront gardées dans les analyses subséquentes puisque la corrélation est supérieure à 25%.

La figure 4.5a) représente un profil semi-logarithmique de la vitesse longitudinale moyenne. La valeur de la vitesse de cisaillement pour ce profil est de  $5 \pm 2 \text{ cms}^{-1}$  et la rugosité est de  $2 \pm 4 \text{ mm}$ . Le profil de l'énergie cinétique turbulente montre que cette quantité augmente plus on se rapproche du lit. Les cisaillements de Reynolds présentent également une augmentation lorsqu'on se rapproche du lit, même si la valeur maximale de cette quantité n'est pas atteinte dans la dernière cellule. La vitesse de cisaillement,  $u_R^*$ , évaluée à partir de la valeur maximale du cisaillement de Reynolds à 21 *cm* du lit ( $z = 0.2 Z$ ) est de  $2.5 \text{ cms}^{-1}$ .

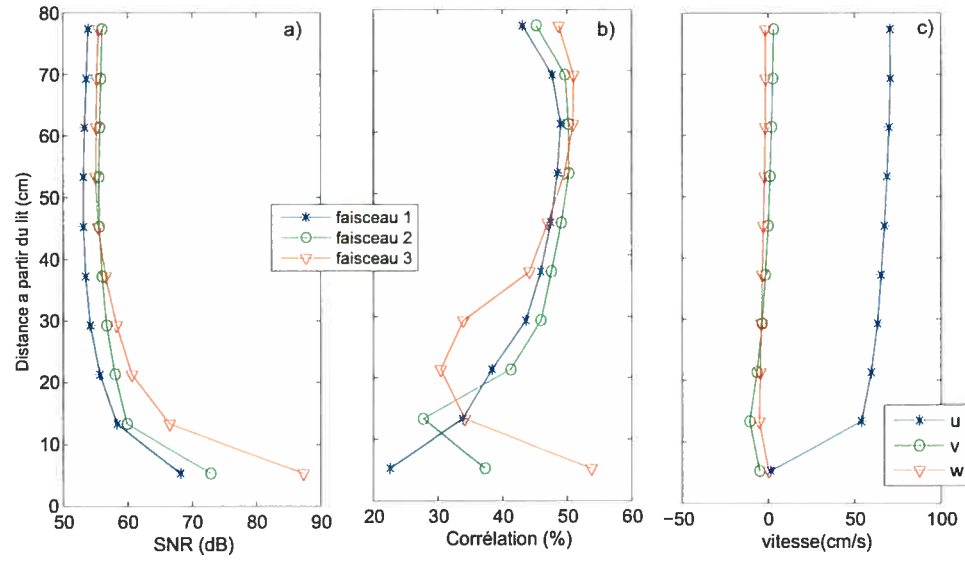


Figure 4.4 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série R2507 dans un écoulement uniforme au dessus de dunes ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ,  $Z = 98 \text{ cm}$ ). Nous avons fixé les paramètres du PC-ADP afin d'échantillonner des profils comprenant 10 cellules de 8 cm à 1 Hz. La distance maximale du profil,  $r_{max}$ , était de 1.06 m, et 14 à 15 échantillons de vitesses étaient utilisés pour chaque mesure.

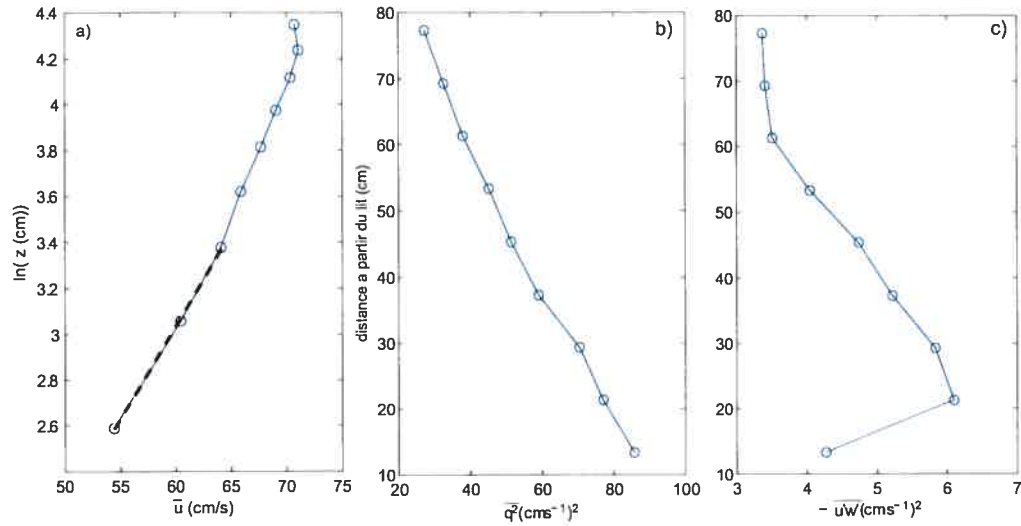


Figure 4.5 – Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R2507 dans un écoulement uniforme au dessus de dunes ( $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ,  $Z = 98 \text{ cm}$ ).

Une deuxième série de mesures a été recueillie dans le même type de milieu fluvial. Les mesures de la série R2007 proviennent d'un écoulement de vitesse moyenne de  $45 \text{ cm s}^{-1}$  et de  $85 \text{ cm}$  de profondeur au dessus de dunes de  $5 \text{ cm}$  de hauteur. Cette série est gravement affectée par l'interférence entre les impulsions. Les mesures des cellules 6 et 7 sont rejetées des analyses qui suivent puisque leur pourcentage de corrélation est inférieur à 25%. La cellule 8 a un pourcentage de corrélation très près de 25%. Les mesures de cette cellule sont gardées dans les profils de vitesses moyennes, d'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds. Les profils de vitesses mesurés par le PC-ADP dans cet environnement nous permettent tout de même d'obtenir des valeurs estimées de vitesse de cisaillement et de rugosité mais elles doivent être interprétées avec précaution. La vitesse de cisaillement estimée à partir du profil semi-logarithmique de vitesse,  $u_L^*$ , est de  $4 \pm 1 \text{ cm s}^{-1}$  et la rugosité,  $z_0$ , est de  $4 \pm 7 \text{ mm}$ . La vitesse de cisaillement évaluée en extrapolant le profil linéaire des cisaillements de Reynolds,  $u_R^*$ , est de  $1.8 \text{ cm s}^{-1}$ .

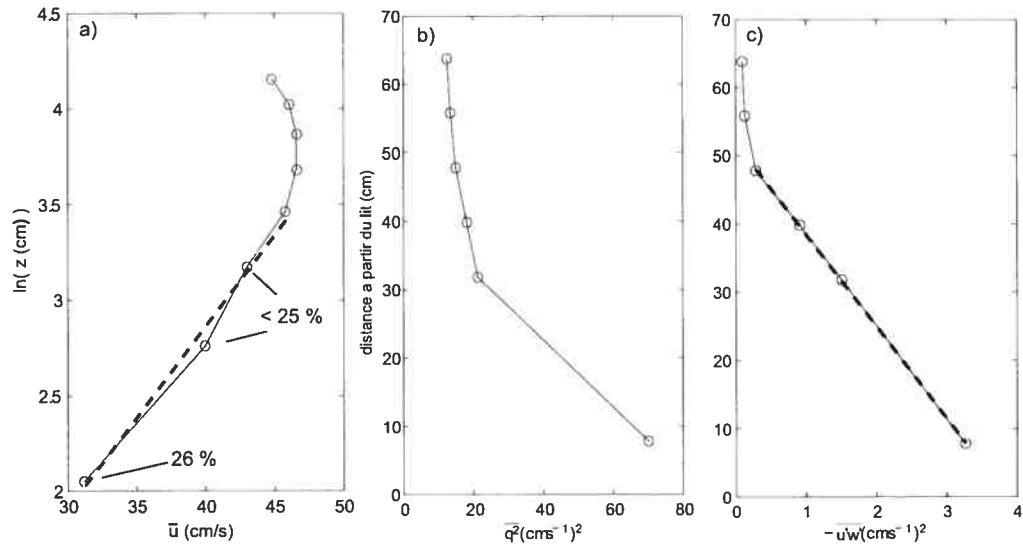


Figure 4.6 – Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série R2007 dans un écoulement uniforme au dessus de dunes ( $\bar{u} = 45 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 85 \text{ cm}$ ). Le pourcentage de corrélation est indiqué pour les trois dernières cellules.

### 4.1.3 Écoulement en accélération et décélération dans une mouille

Toutes les mesures dans cet environnement seront présentées puisqu'elles ont été recueillies à des localisations différentes dans la mouille de la rivière Eaton, une rivière à lit de graviers. Les profils de vitesses sont numérotés du début à la sortie de la mouille (voir carte 2.9). Afin d'évaluer la qualité des données mesurées par le PC-ADP, nous présenterons d'abord les profils de rapport signal-à-bruit, de pourcentage de corrélation et de vitesse longitudinale moyenne pour chacun des quatre sites. Ensuite suivront les profils semi-logarithmiques de vitesse, d'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds pour l'ensemble des sites.

La série temporelle E0610-1 a été recueillie à l'entrée de la mouille de la rivière Eaton-Nord (voir figure 2.9). Il n'était pas possible de mesurer à l'amont de ce point car la vitesse élevée et la forte turbulence de l'écoulement déplaçaient trop rapidement les particules en suspension pour que l'appareil puisse corréler les impulsions entre elles. Le pourcentage de corrélation des mesures était donc inférieur à 25 % et les données recueillies ne pouvaient être utilisées. Le PC-ADP a donc été placé dans l'écoulement plus lent au milieu de la mouille où la profondeur est de 84 *cm*. La durée de la série temporelle est de 26 minutes. Les profils moyens du rapport signal-à-bruit, de pourcentage de corrélation et de vitesses sont présentés à la figure 4.7. Le profil semble être affecté par une interférence entre les impulsions causée par le fort retour des impulsions sur le lit. Cependant, le pourcentage de corrélation est supérieur à 45%, ce qui est relativement bon, et toutes les données seront conservées dans les analyses. Le profil de vitesse moyenne à l'entrée de la mouille est typique d'un écoulement en décélération où la vitesse vers la surface de l'eau est plus faible. À l'entrée de la mouille de la rivière Eaton-Nord et à l'amont du site de mesure, la profondeur augmente et la vitesse de l'écoulement diminue. Par contre, près du site de mesure de la série E0610-1, la roche en place vient modifier l'écoulement. La largeur du chenal diminue et l'écoulement subit une accélération. Le profil observé est typique d'un écoulement en accélération.

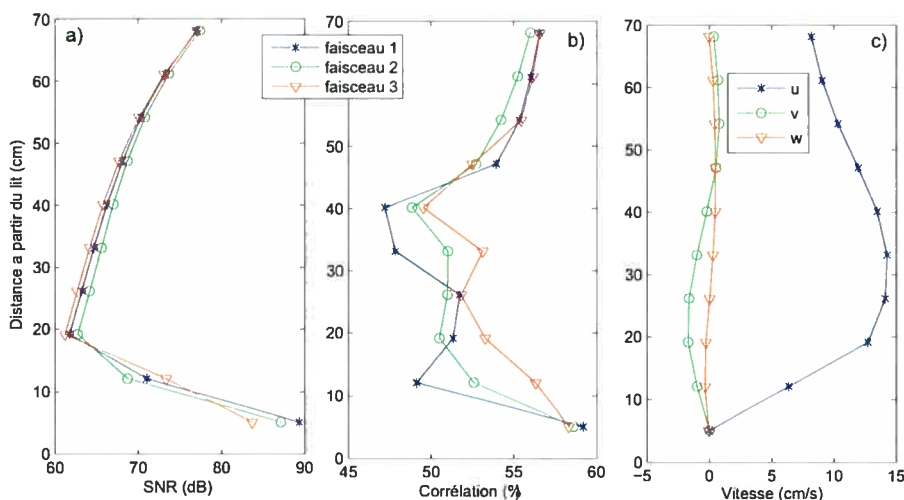


Figure 4.7 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-1 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 10 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 84 \text{ cm}$ ). Le profil du PC-ADP contient 10 cellules de  $7 \text{ cm}$  et a été échantillonné à une fréquence de  $1 \text{ Hz}$  utilisant un  $r_{\max}$  de  $1.23 \text{ m}$  et de 14 à 15 échantillons de vitesse par mesure.

La deuxième série de mesures, E0610-2, a été recueillie à l'aval du premier site de mesure au centre de la mouille. La profondeur  $y$  est de  $93 \text{ cm}$  et la vitesse moyenne de l'écoulement est de  $20 \text{ cm s}^{-1}$ . Le deuxième site de mesure se situe donc dans un écoulement plus profond et plus rapide qu'à l'entrée de la mouille où la vitesse moyenne était de  $10 \text{ cm s}^{-1}$ . La figure 4.8 présente les profils moyens du rapport signal-à-bruit, des corrélations et des vitesses moyennes. Les rapports signal-à-bruit plus élevés indiquent que la dernière cellule est située dans le lit de la rivière. Les pourcentages de corrélation sont généralement bons sur toute la tranche d'eau à l'exception des mesures du faisceau 2 dans la quatrième cellule, probablement affectées par la réflexion des impulsions sur le lit. Cette mesure sera cependant conservée dans les analyses puisque le pourcentage de corrélation est supérieur à 30%. La vitesse longitudinale moyenne est deux fois plus élevée près de la surface que celle du site précédent.



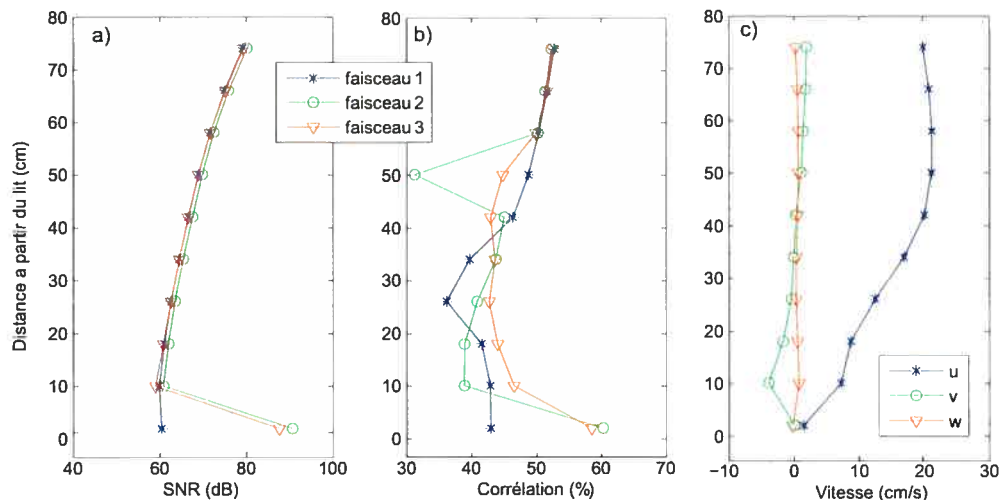


Figure 4.8 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-2 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 20 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 93 \text{ cm}$ ). Le PC-ADP a échantillonné dans 10 cellules de 8 cm utilisant une distance entre les impulsions,  $r_{\max}$ , de 1.31 m.

La série temporelle E0610-3 a été recueillie dans la deuxième moitié de la mouille de la rivière Eaton-Nord (voir figure 2.9). La profondeur est de 102 cm. La durée de la série temporelle est d'un peu plus de 30 minutes. Les profils moyens de rapport signal-à-bruit, de pourcentage de corrélation et de vitesses sont présentés à la figure 4.9. La cellule 11, qui a des rapports signal-à-bruit de plus de 70 dB, correspond aux réflexions des impulsions sur le lit de la rivière. La mesure du faisceau 1 à l'intérieur de la cellule 10 a une valeur de rapport signal-à-bruit plus élevée, ce qui laisse penser qu'une partie de la cellule se retrouve peut-être dans le lit. En conséquence, la vitesse moyenne de cette cellule est probablement sous-estimée. La cellule 8 du faisceau 1 est affectée par l'interférence entre les impulsions mais cette cellule sera conservée dans les analyses puisque le pourcentage de corrélation y est relativement bon (autour de 40%). Le profil de vitesse longitudinale moyenne recueilli dans cet environnement présente des vitesses plus élevées que la série de mesures E0610-2 dans la portion de la tranche d'eau qui couvre les 20 à 40 cm au dessus du lit. La vitesse de l'écoulement près de la surface de l'eau demeure la même que celle de la série de mesure plus près de l'entrée de la mouille mais

l'écoulement accélère près du lit.

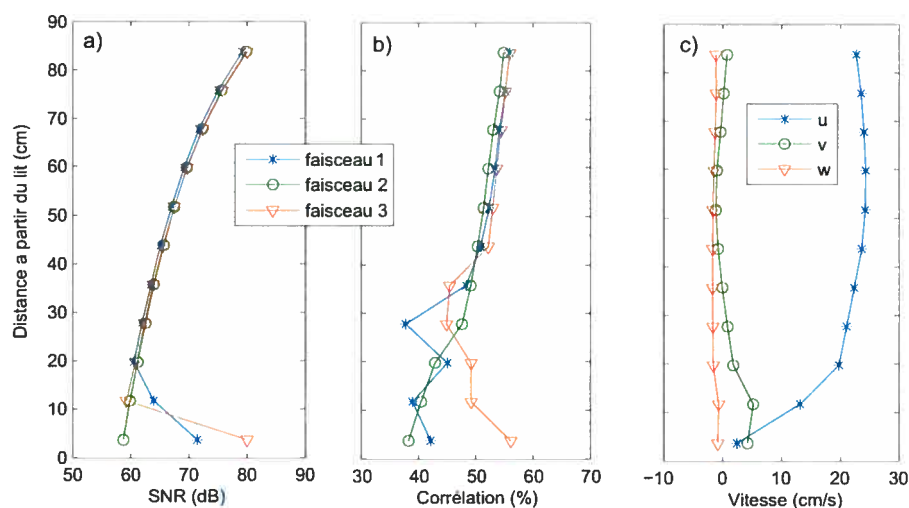


Figure 4.9 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-3 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 20 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 102 \text{ cm}$ ). Le profil du PC-ADP contient 11 cellules de 8 cm et a été échantillonné à une fréquence de 1 Hz utilisant un  $r_{max}$  de 1.29 m et de 11 à 12 échantillons de vitesse par mesure.

La dernière série de mesure, E0610-4, a été recueillie au centre de la mouille à l'aval des trois premiers sites au centre de la mouille. La profondeur et la vitesse moyenne de l'écoulement sont semblables à celles de la série E0610-3, soit de 101 cm et  $20 \text{ cm s}^{-1}$  respectivement. Les paramètres d'échantillonnage sont exactement les mêmes que pour le profil de vitesse précédent. Les profils moyens de rapport signal-à-bruit, de pourcentage de corrélation et de la vitesse longitudinale sont présentés à la figure 4.10. La cellule 12 est placée dans le lit de la rivière comme le révèle le rapport signal-à-bruit plus élevé. Les mesures des cellules 8 et 9 semblent être affectées par l'interférence entre les impulsions mais seront conservées dans les analyses puisque la corrélation des mesures est supérieure à 40%. Le profil de la vitesse longitudinale moyenne présente plutôt la forme d'un profil typique d'un écoulement uniforme. L'écoulement à ce site de mesure semble rétabli du changement de profondeur à l'entrée de la mouille.

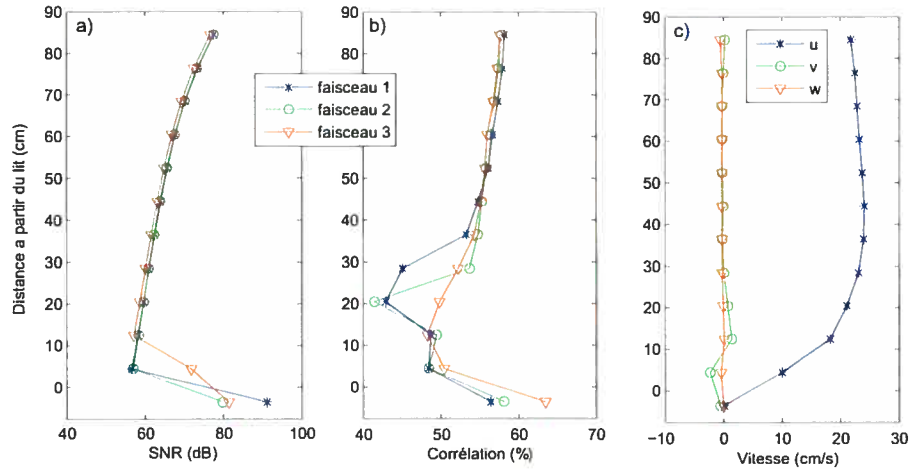


Figure 4.10 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour la série E0610-4 dans l'écoulement à l'intérieur d'une mouille ( $\bar{u} = 20 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $Z = 101 \text{ cm}$ ). Le profil du PC-ADP contient 12 cellules de 8 cm et a été échantillonné à une fréquence de 1 Hz utilisant un  $r_{max}$  de 1.29 m et de 11 à 12 échantillons de vitesse par mesure.

La figure 4.11 résume les profils semi-logarithmiques de vitesse longitudinale moyenne, d'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds pour les quatre sites de mesures dans la mouille. Ces profils nous permettent d'observer et de décrire les changements dans la structure de l'écoulement en se déplaçant vers l'aval dans la mouille.

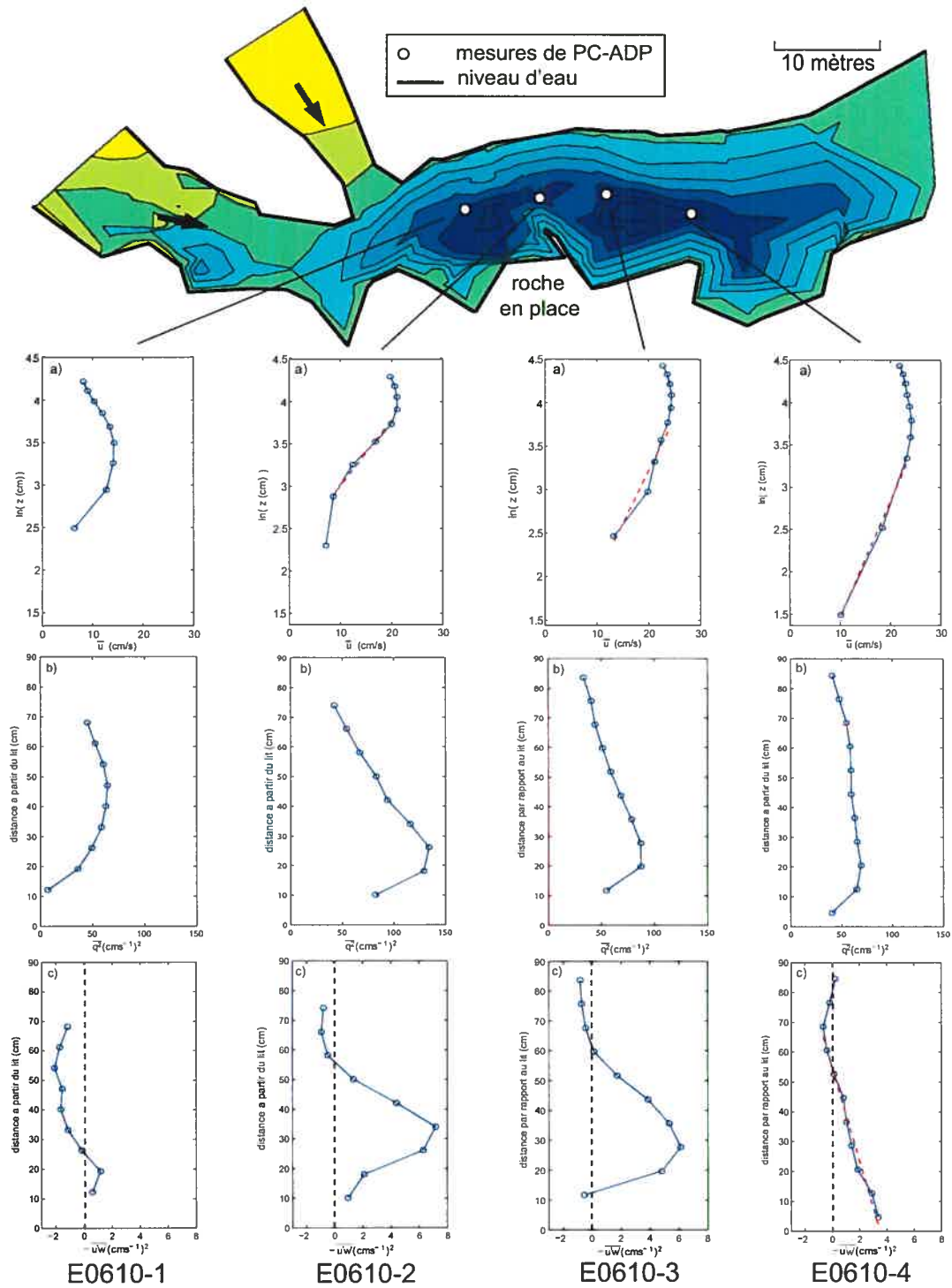


Figure 4.11 – Profil de la a) vitesse moyenne ( $\bar{u}$ ), b) énergie cinétique turbulente ( $\overline{q^2}$ ) et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) mesurés par le PC-ADP pour les quatre endroits de mesure dans la mouille de la rivière Eaton-Nord.

Le profil de vitesse du premier site de mesure à l'entrée de la mouille, E0610-1, est caractérisé par des vitesses plus faibles près de la surface de l'eau et est typique d'un écoulement en accélération. Cette accélération est causée par la constriction créée par la roche en place (sur la figure 4.11). Le profil de vitesses ne présente aucune portion semi-logarithmique, ce qui nous empêche d'estimer la vitesse de cisaillement et la rugosité. Le deuxième site de mesure, E0610-2, présente une augmentation des vitesses près de la surface de l'eau comparativement au site de mesure à l'entrée de la mouille. Les valeurs de  $u_L^*$  et  $z_0$  estimées à partir du profil semi-logarithmique de la vitesse longitudinale moyenne sont les plus élevées des quatre profils dans la mouille, soit  $6 \pm 2 \text{ cms}^{-1}$  et  $10 \pm 10 \text{ cm}$ . Les mesures près du lit de la série E0610-3 sont de moins bonne qualité, notamment parce que la dernière cellule est trop près du lit. Puisque les valeurs près du lit ne sont pas fiables, l'estimation de  $u_L^*$  est donc plus difficile. La vitesse de cisaillement obtenue par la régression linéaire de ces points sur cette figure est de  $3 \pm 1 \text{ cms}^{-1}$  et la rugosité est de  $2 \pm 4 \text{ cm}$ . Les mesures à la sortie de la mouille, E0610-4, sont celles où la portion logarithmique est la plus évidente. Les valeurs de  $u_L^*$  et de  $z_0$  obtenues sont de  $2.9 \pm 0.7 \text{ cms}^{-1}$  et  $1 \pm 1 \text{ cm}$ . On observe donc une décroissance des valeurs de vitesses de cisaillement et de rugosité lorsqu'on se déplace vers l'aval à l'intérieur de la mouille. Cette diminution de  $u_L^*$  est typique des écoulements en décélération dans une mouille (MacVicar, 2006).

Le profil d'énergie cinétique turbulente de la première série de mesure, E0610-1, est différent de ceux des autres séries de mesures. La valeur maximale d'énergie turbulente est atteinte au centre de la tranche d'eau tandis que pour les trois autres sites de mesure, le maximum est atteint plus près du lit. Les valeurs d'énergie cinétique turbulente près de la surface sont sensiblement les mêmes pour ces trois sites de mesures mais le taux d'augmentation vers le lit varie selon la position de la mesure dans la mouille. La valeur maximale n'est pas atteinte près du lit mais plutôt entre 20 et 30 cm au dessus du lit, ce qui correspond à 0.2 et 0.3 de la profondeur de l'écoulement. Ce type de profil a également été observé dans des écoulements en décélération (Kironoto et Graf, 1995) mais est généralement typique de la plupart

des écoulement (Biron *et al.*, 2004). Le gradient de vitesse à cette hauteur est plus élevé que dans le cas d'un écoulement uniforme, ce qui augmente l'échange de quantité de mouvement et la génération de turbulence. Le deuxième site de mesures, E0610-2, est celui où le gradient de vitesse entre 20 et 30 *cm* au-dessus du lit est le plus prononcé et où la valeur maximale d'énergie cinétique turbulente est atteinte. Plus on se déplace vers l'aval, plus l'énergie cinétique turbulente est faible.

Les valeurs de cisaillement de Reynolds du site de mesure à l'entrée de la mouille sont négatives sur toute la tranche d'eau à l'exception d'une région près du lit. La magnitude des cisaillements s'accroît en s'éloignant du lit. Lorsque  $-\overline{u'w'}$  est négatif, cela signifie que des vitesses longitudinales plus élevées que la moyenne sont associées à des vitesses verticales plus élevées que la moyenne et vice-versa. Une région près de la surface de l'écoulement où les cisaillements sont négatifs est également présente pour les trois autres sites de mesure dans la mouille. Les cisaillements de Reynolds pour ces trois sites de mesure augmentent en se rapprochant du lit. La valeur maximale du cisaillement de Reynolds est atteinte à 34 *cm* pour la série E0610-2 et 28 *cm* pour la série E0610-3, ce qui correspond à des valeurs de 0.37 et 0.27 de la profondeur de l'écoulement. Ce type de profil a également été observé dans un écoulement en décélération (Kironoto et Graf, 1995). Les valeurs de cisaillements de Reynolds sont les plus élevées dans le profil de la série E0610-2 et diminuent lorsqu'on se déplace vers l'aval. Les valeurs de  $u_R^*$ , estimées en utilisant la valeur maximale du profil des cisaillements de Reynolds près du lit, sont de 2.7 *cms*<sup>-1</sup> pour la série E0610-2 et de 2.5 *cms*<sup>-1</sup> pour la série E0610-3. La dernière série de mesures dans la mouille, E0610-4, est celle où le profil des cisaillements de Reynolds se rapproche le plus du profil linéaire théorique et où la valeur de cisaillement maximale est atteinte près du lit. La valeurs de  $u_R^*$  estimées en extrapolant ce profil linéaire des profils de cisaillements de Reynolds est de 1.9 *cms*<sup>-1</sup>. Comme nous l'avons observé à partir des profils semi-logarithmiques de vitesses, la vitesse de cisaillement,  $u_R^*$ , diminue en se déplaçant vers l'aval dans la mouille de la rivière Eaton-Nord.

Ces profils de vitesses, d'énergie cinétique turbulente et de cisaillements de Reynolds sont typiques d'un écoulement dans une mouille (MacVicar, 2006). La constriction créée par la roche en place à l'entrée de la mouille entraîne une accélération de l'écoulement à cet endroit. Les données des séries E0610-2 et E0610-3 illustrent la position de la couche de cisaillement dans l'écoulement à 34 et 28 *cm* du lit. La série E0610-4 est probablement à l'aval de point de réattachement de la zone de séparation où l'écoulement est redevenu uniforme.

#### 4.1.4 Séparation verticale et forte rugosité

Le PC-ADP a été déployé dans un écoulement comprenant une zone de séparation autour de larges blocs. Pour ce faire, nous avons placé le PC-ADP de façon à ce que le faisceau 1 sonde l'écoulement entre deux blocs de la rivière du Nord. Les profondeurs mesurées par les faisceaux 1, 2 et 3 sont donc très différentes ; soit de 86, 56 et 65 *cm* respectivement, ce qui reflète la forte rugosité causée par la présence des blocs. Nous avons fixé les paramètres du PC-ADP pour échantillonner à 1 Hz dans 10 cellules de 8 cm avec un  $r_{max}$  de 1.05 m. La série temporelle est d'une durée de 40 minutes et 14 à 15 échantillons ont été utilisés par mesure de vitesse. La figure 4.12 montre les profils moyens du rapport signal-à-bruit, de la corrélation et de la vitesse dans cet environnement en utilisant la profondeur comme étant celle mesurée par le faisceau 1. Les lignes pointillées illustrent la profondeur telle que mesurée par les trois faisceaux du PC-ADP. Le rapport signal-à-bruit est maximal lorsque les faisceaux atteignent le lit et le pourcentage de corrélation est supérieur à 30 % pour les six premières cellules. Les profils de vitesses moyennes sont typiques d'un écoulement en séparation verticale. La vitesse longitudinale est négative derrière le bloc, zone qui est représentée comme étant sous la ligne pointillée verte dans la figure 4.12c. Au-dessus de ces blocs, la vitesse longitudinale présente une augmentation rapide vers la surface dans la zone d'écoulement externe.

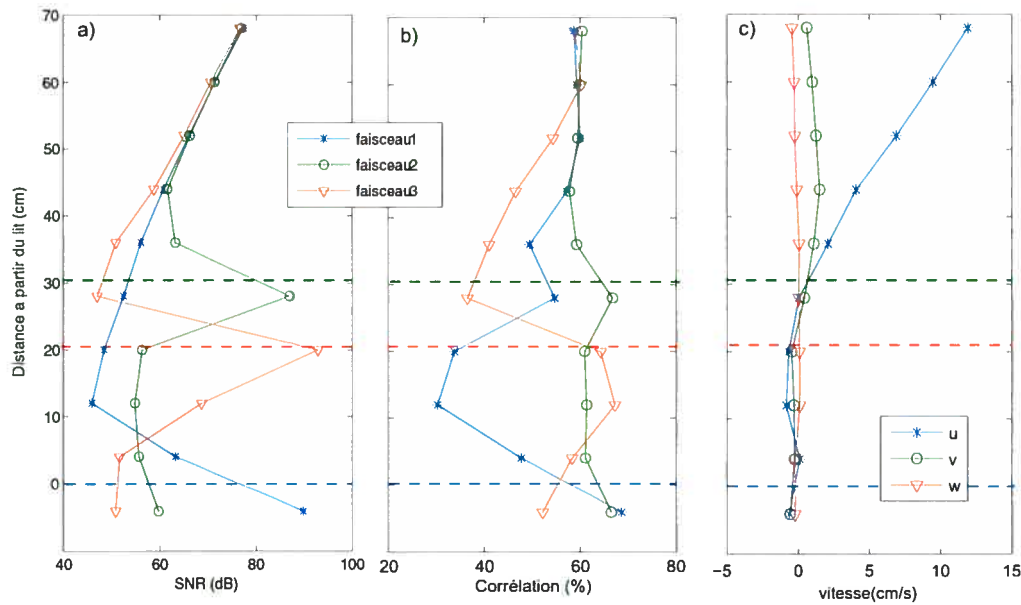


Figure 4.12 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour le profil N2508-1 dans l'écoulement en séparation verticale autour de larges blocs.

Nous avons déterminé la position du lit,  $z = 0$ , comme étant celle mesurée par le faisceau 1 sur le profil semi-logarithmique de vitesse. Les profondeurs mesurées par les faisceaux 2 et 3 reflètent plutôt la position des blocs au dessus du lit. La partie semi-logarithmique se situe dans la partie supérieure (cellules 4 à 6) de l'écoulement au dessus des blocs. La vitesse de cisaillement obtenue est de  $3.47 \pm 0.8 \text{ cm s}^{-1}$  et la rugosité est de  $30 \pm 70 \text{ cm}$ . Les profils d'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds sont uniquement tracés pour l'écoulement au dessus des blocs car les mesures des faisceaux 2 et 3 ne sont pas disponibles en-dessous de cette hauteur. Contrairement aux autres exemples recueillis dans des écoulements uniformes au dessus de rides ou de dunes, l'énergie cinétique turbulente et le cisaillement de Reynolds augmentent en se rapprochant vers la surface de l'écoulement. Puisque le cisaillement de Reynolds ne suit pas le profil linéaire attendu,  $u_R^*$  ne peut pas être obtenu par cette méthode.



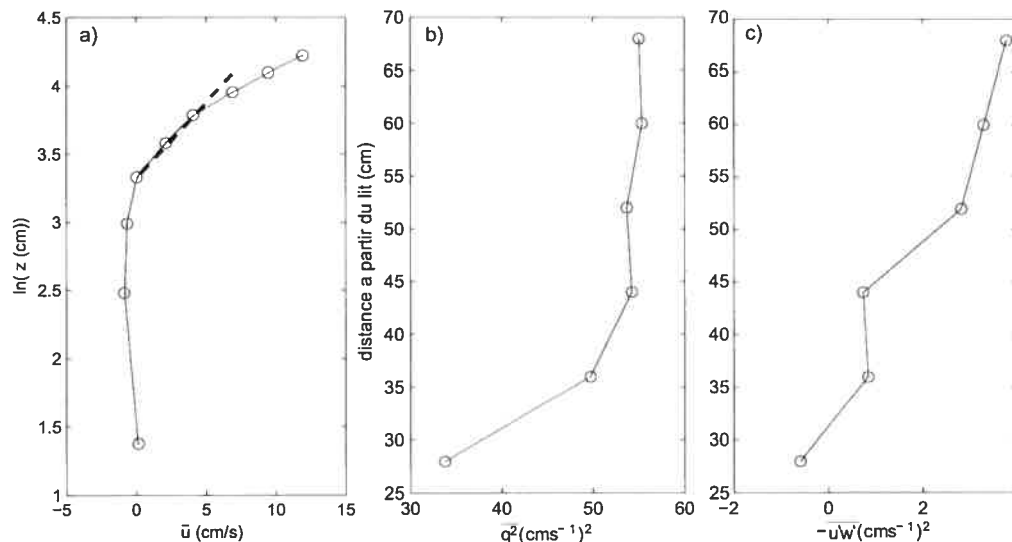


Figure 4.13 – Profil de la a) vitesse moyenne, b) énergie cinétique turbulente et des c) cisaillements de Reynolds ( $-\overline{u'w'}$ ) de la série N2508-1 dans l'écoulement en séparation verticale autour de larges blocs.

#### 4.1.5 Séparation horizontale à l'aval un banc d'accumulation

Les vitesses de PC-ADP mesurées dans cet environnement seront traitées différemment des quatre autres environnements. Ces séries de données ont été recueillies dans la rivière Rouge à haut niveau d'eau dans une zone de séparation derrière un banc d'accumulation (voir carte 2.8). Le site de mesure se retrouvait dans la zone de recirculation à l'aval du banc d'accumulation partiellement submergé, où la vitesse longitudinale de l'écoulement était presque nulle. Cette zone morte se retrouvait entre deux écoulements de vitesses différentes, soit d'un côté, l'écoulement plus rapide dans le chenal principal et de l'autre, l'écoulement moins rapide entre la berge et le banc d'accumulation. Ces séries de mesures présentent de grandes oscillations dans les vitesses longitudinales et latérales sur toute la tranche d'eau. La série du 17 mai, recueillie dans un écoulement de 92 cm de profondeur, est un exemple de mesure dans ce type d'environnement. La vitesse latérale, qui est représentée à la figure 4.14, varie entre 20 à  $-20 \text{ cm s}^{-1}$ .

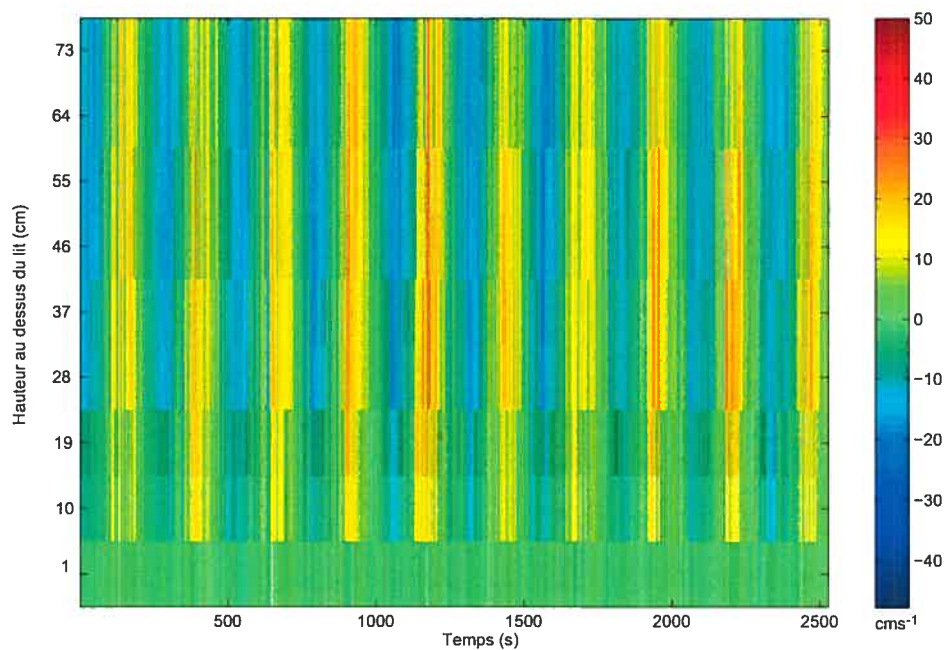


Figure 4.14 – Vitesse latérale de la série R1705 dans l'écoulement en séparation horizontale à l'aval d'un banc d'accumulation. La direction de l'écoulement change de  $180^\circ$  selon une période de deux minutes.

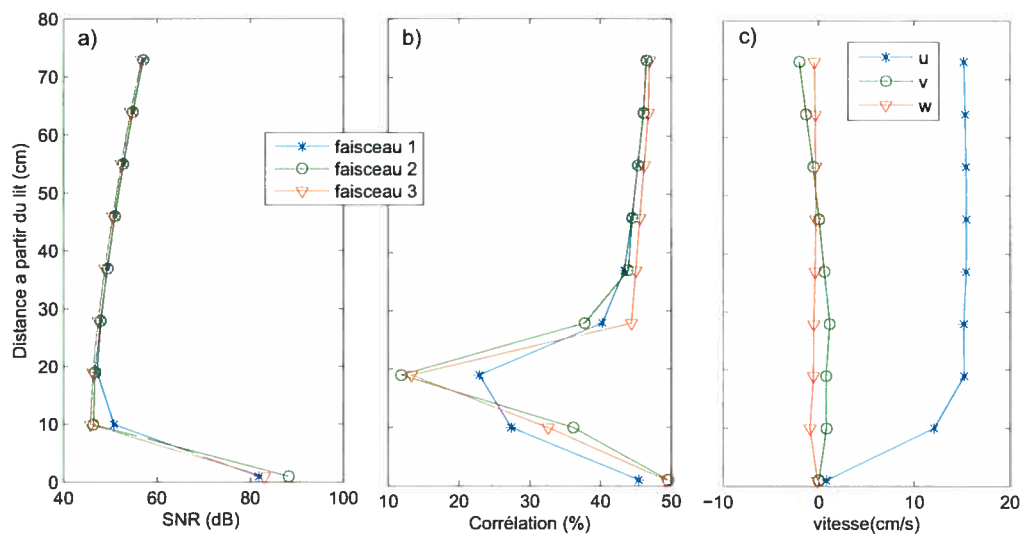


Figure 4.15 – Profils des valeurs moyennes du a) rapport signal-à-bruit (SNR), b) pourcentage de corrélation et c) vitesses pour le profil R1705-1 dans l'écoulement en séparation horizontale à l'aval d'un banc d'accumulation.

Nous avons fixé les paramètres du PC-ADP afin d'échantillonner des profils comprenant neuf cellules de 9 *cm* à 1 Hz. La distance maximale du profil,  $r_{max}$ , était de 1.09 m, et 13 à 14 échantillons de vitesses étaient utilisés pour chaque mesure. Cette série a une longueur de plus de 40 minutes. La qualité des données est évaluée de la même façon que dans le cas des exemples précédents. Les profils du rapport signal-à-bruit, du pourcentage de corrélation et de vitesses moyens sont présentés à la figure 4.15. Les mesures de la cellule 7 sont décorrélées par l'interférence entre les impulsions et doivent être rejetées de l'analyse. La cellule 9, par son rapport signal à bruit très élevé, correspond à la position du lit. La vitesse longitudinale moyenne est assez constante le long de la tranche d'eau.

Puisque les séries de vitesses sont caractérisées par des périodicités de l'ordre de quatre minutes, les profils de quantités moyennes de l'écoulement tels la vitesse longitudinale moyenne, les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente ne peuvent être estimés. Les fluctuations de vitesses ne peuvent être extraites de ces séries de vitesses puisqu'on ne peut retirer la tendance par une régression linéaire.

Les spectres d'énergie et les fonctions d'autocorrélation seront utilisés ici afin d'illustrer la périodicité des mesures de vitesses. Les spectres d'énergie nous permettent d'identifier les pics de fréquence correspondant à la périodicité des structures de l'écoulement (figure 4.16). Sur trois des quatre séries mesurées dans la zone de séparation (R1705, R0707, R2809), un pic est clairement visible dans les composantes longitudinale et latérale de l'écoulement des mesures. Les périodes correspondantes sont de 250 secondes pour le 17 mai et le 7 juillet et de 200 secondes pour le 28 septembre. La composante verticale de l'écoulement ne semble pas être périodique puisqu'aucun pic n'est présent.

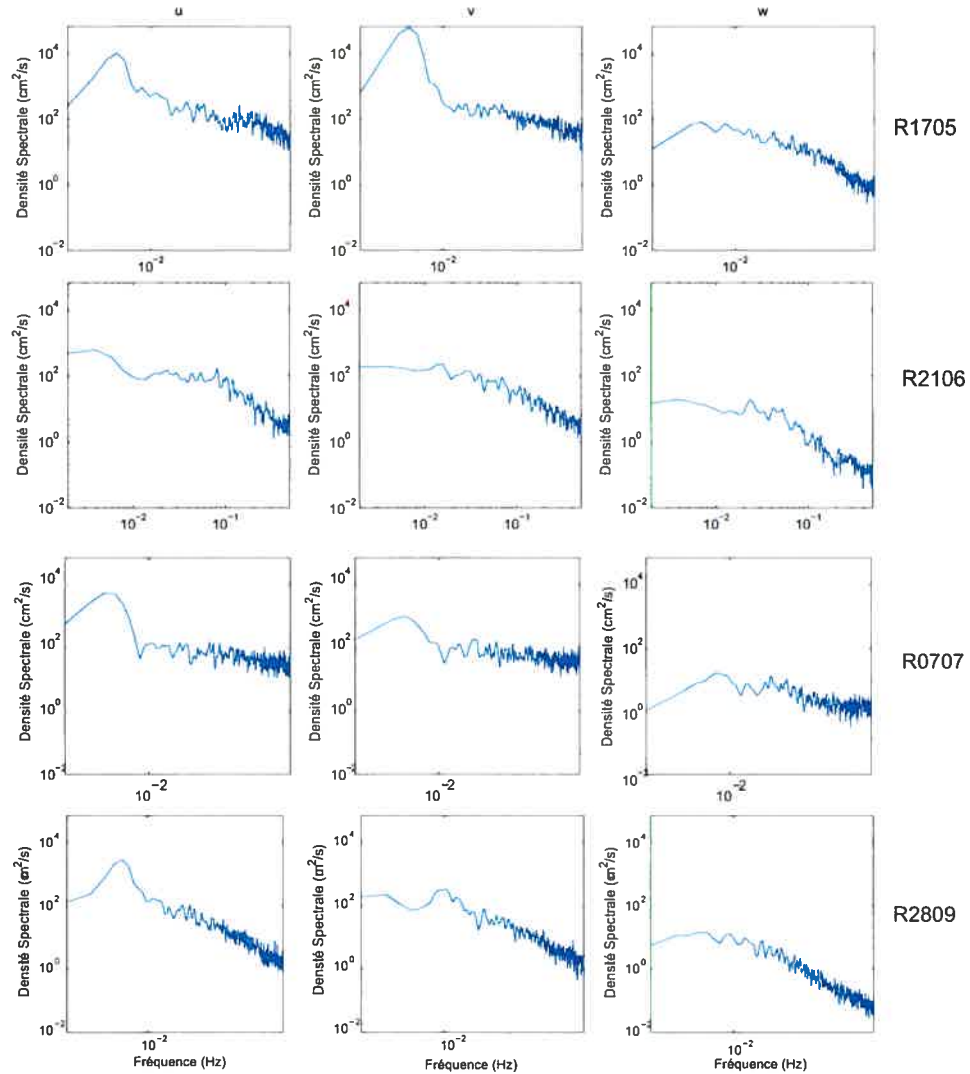


Figure 4.16 – Spectres d'énergie des composantes longitudinale, latérale et verticale des mesures à  $z = 0.5 Z$  des quatre sites dans un écoulement en séparation horizontale.

La figure 4.17 montre les fonctions d'autocorrélation des quatre séries de mesures du PC-ADP à  $z/Z = 0.5$ . La structure périodique est clairement visible pour les séries R1705, R0707 et R2809 mais semble moins claire pour la série R2106-2. Les valeurs d'*ITS* (*Integral Time Scale*) estimées à partir des fluctuations de vitesses longitudinales à  $z = 0.5 Z$  sont de 16 secondes pour la série R1705, 8 secondes pour la série R2106-1, 19 secondes pour R0707 et 20 secondes pour R2809.

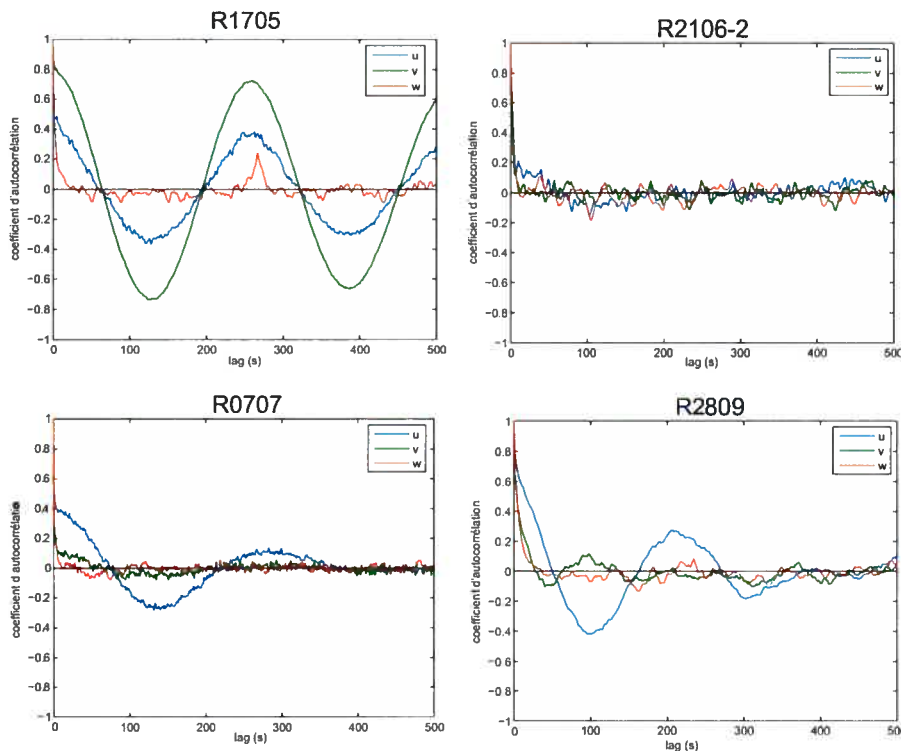


Figure 4.17 – Fonctions d'autocorrélation de la composante longitudinale des mesures à  $z = 0.5 Z$  des quatre sites dans un écoulement en séparation horizontale.

L'écoulement dans la zone de recirculation derrière le banc d'accumulation est donc caractérisé par des mouvements horizontaux à grande échelle sur toute la tranche d'eau. Ces quatre séries de mesures ont été recueillies approximativement au même endroit de la rivière Rouge, soit à l'aval du banc d'accumulation (voir figure 2.8) mais à différents niveaux d'eau. La période des oscillations semble dépendre du niveau d'eau et de la topographie du lit de la rivière. Étant donné que l'aire à cartographier est très grande et que certaines zones ne sont pas accessibles à haut niveau d'eau, la carte topographique détaillée de la rivière Rouge lors de ces événements n'a pu être réalisée. De plus, les vitesses d'écoulement dans le chenal principal de la rivière Rouge et dans la section entre le banc d'accumulation et la berge n'ont pas été mesurées. L'origine de ces structures reste à déterminer et une étude plus approfondie de ce type d'environnement à l'aide du PC-ADP nous permettrait d'en savoir davantage sur ce phénomène. Néanmoins, le PC-ADP

semble l'instrument idéal pour caractériser ce type d'environnement fluvial puisqu'il permet de capter ces grandes structures qui occupent toute la tranche d'eau.

## 4.2 Comparaison entre les environnements

Dans cette section, nous effectuons une récapitulation des résultats obtenus dans les environnements fluviaux testés. Les vitesses de cisaillement obtenues par le profil de vitesses longitudinales et par les profils linéaires des cisaillements de Reynolds seront comparées. Les profils normalisés d'énergie cinétique turbulente et des cisaillements de Reynolds seront comparés avec les profils théoriques.

### 4.2.1 Vitesse de cisaillement et rugosité

Le tableau 4.2 résume les valeurs de vitesse de cisaillement et de rugosité obtenues à partir de la loi du mur dans les différents environnements fluviaux. Ces valeurs sont disponibles seulement pour les mesures où les vitesses longitudinales moyennes suivaient un profil semi-logarithmique. Les mesures dans les écoulements uniformes en présence de rides ou de dunes, dans la mouille à l'exception de la première mesure et dans la partie supérieure de l'écoulement en séparation verticale sont celles où nous avons pu estimer ces quantités. L'incertitude sur la vitesse de cisaillement et sur la rugosité a été calculée selon la méthode de Wilkinson (1984). En moyenne, l'incertitude sur la vitesse de cisaillement est de 33% et celle sur la rugosité est de 135%. Cependant, ces incertitudes n'incluent pas l'erreur associée au manque de mesures de vitesses dans le premier 20% de la tranche d'eau près du lit. Ces données manquantes impliquent une perte d'information cruciale qui affecte grandement les estimés de vitesse de cisaillement à partir des profils logarithmiques. Biron *et al.* (1998) ont évalué que l'utilisation des vitesses de la tranche d'eau complète entraîne, en écoulement uniforme, ou une surestimation de la contrainte de cisaillement par rapport à la valeur obtenue en utilisant la portion qui couvre le 20% près du lit.

Écoulement et Résistance	Site	$u_L^*$	$z_0$
Uniforme, Rides	R2106-1	$2.8 \pm 0.4$	$(3 \pm 3)mm$
	R1307	$2.3 \pm 0.1$	$(2.0 \pm 0.8)mm$
	R2107	$0.9 \pm 0.5^\dagger$	$(5 \pm 5)\mu m^\dagger$
Uniforme, Dunes	R2007	$4 \pm 1$	$(4 \pm 7)mm$
	R2507	$5 \pm 2$	$(2 \pm 4)mm$
Séparation horizontale, Banc d'accumulation	R1705	n/d	n/d
	R2106-2	n/d	n/d
	R0707	n/d	n/d
	R2809	n/d	n/d
Accélération/ décélération, Mouille	E0610-1	n/d	n/d
	E0610-2	$6 \pm 2$	$(10 \pm 10)cm$
	E0610-3	$3 \pm 1$	$(2 \pm 4)cm$
	E0610-4	$2.9 \pm 0.7$	$(1 \pm 1)cm$
Séparation verticale, Forte rugosité	N2508-1	$4 \pm 3$	$(30 \pm 70)cm$
	N2508-2	$4 \pm 1$	$(30 \pm 30)cm$

Tableau 4.2 – Vitesse de cisaillement,  $u_L^*$  en  $cms^{-1}$ , et rugosité,  $z_0$ , déterminées à partir de la loi du mur.  $^\dagger$  : basé sur des mesures de vitesses décorrélées en bas de profil ou trop près du lit. n/d : données non-disponibles.

On retrouve les valeurs de vitesses de cisaillement les plus élevées dans le cas de l'écoulement uniforme avec des dunes et pour la deuxième mesure dans la mouille. Les plus grandes valeurs de rugosité sont obtenues dans l'écoulement en présence de forte rugosité où il y a une forte séparation verticale. Même si les barres d'erreur sur les valeurs de rugosité sont très grandes, la différence est de deux ordres de grandeurs entre les environnements de faible et de forte résistance. Les valeurs de  $z_0$  obtenues à partir des mesures de vitesses du PC-ADP permettent donc de faire la différence entre les milieux de faible et de forte rugosité.

Les valeurs de  $u_R^*$ , obtenues à partir des profils des cisaillements de Reynolds et de  $u_L^*$ , obtenues des profils de vitesses moyennes, dans les différents milieux sont comparées à la figure 4.18. Lorsque les profils linéaires de cisaillement de Reynolds n'étaient pas observés, la valeur maximale du profil entre  $z = 0.1Z$  et  $z = 0.3Z$  a été utilisée pour estimer la vitesse de cisaillement. Les cisaillements de Reynolds mesurés dans l'écoulement en séparation verticale présentaient une augmentation vers la surface et ne permettaient pas d'estimer la valeur de  $u_R^*$  (voir figure 4.13(c)).

Les valeurs estimées pour la vitesse de cisaillement dans cet environnement ne sont donc pas représentées à la figure 4.18. Puisque l'erreur d'estimation du cisaillement de Reynolds est plus difficile à évaluer et dépend grandement de la qualité des mesures de vitesses, elle n'est pas prise en compte dans ce graphique.

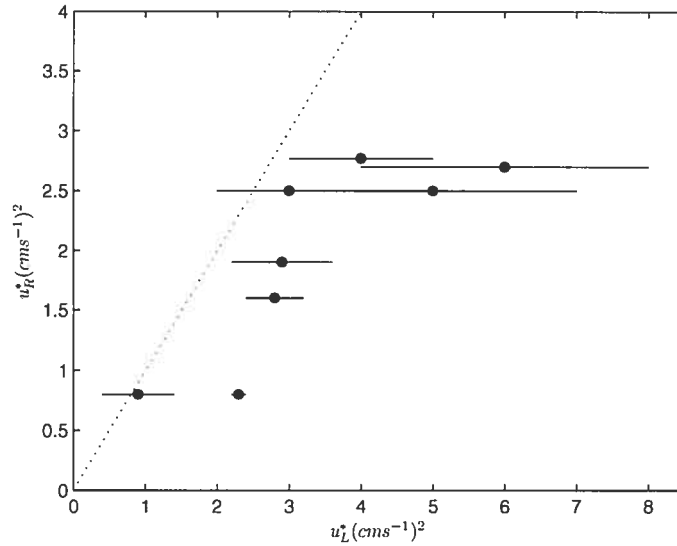


Figure 4.18 – Comparaison entre les vitesses de cisaillement mesurées par la loi du mur,  $u_L^*$ , et par le profil des cisaillements de Reynolds,  $u_R^*$ . La ligne pointillée indique la droite de pente 1.

La corrélation ( $r$ ) entre les valeurs de  $u_L^*$  et  $u_R^*$  est de 0.82. Les valeurs de  $u_R^*$  sont généralement plus faibles que celles de  $u_L^*$ . La comparaison des mesures de PC-ADP avec celles de l'ADV avait démontré, au chapitre précédent, que les cisaillements de Reynolds sont en général sous-estimés par le PC-ADP. Les deux valeurs de vitesses de cisaillement sont sensibles au manque de données en bas de profil (Biron *et al.*, 2004). Puisque le profil des cisaillements de Reynolds n'est généralement pas linéaire, les mesures entre  $z = 0.1Z$  et  $z = 0.3Z$  doivent être utilisées afin de déterminer la valeur maximale. En ce qui a trait aux valeurs de  $u_L^*$ , elles ont pu également être surestimées ou sous-estimées par l'utilisation d'une plus grande portion de la tranche d'eau, comme l'ont observé Biron *et al.* (1998). Par contre, l'estimation des cisaillements de Reynolds est plus sensible à la qualité des



mesures du PC-ADP que la vitesse moyenne (voir section 3.5). Nous privilégierons donc l'utilisation de  $u_L^*$ , dans les cas où les vitesses ont pu être mesurées dans le premier 20% de l'écoulement près du lit. Dans le cas contraire, les valeurs de  $u_R^*$  peuvent être utilisées dans un écoulement uniforme et relativement homogène et si le pourcentage de corrélation des mesures de vitesses du PC-ADP est bonne.

#### 4.2.2 Profils normalisés

Afin de comparer entre eux les profils des différents environnements testés, les valeurs de  $u_L^*$  seront utilisées pour normaliser les valeurs d'énergie cinétique turbulente et de cisaillement de Reynolds. Les distances à partir du lit sont également normalisées par la profondeur de chaque site.

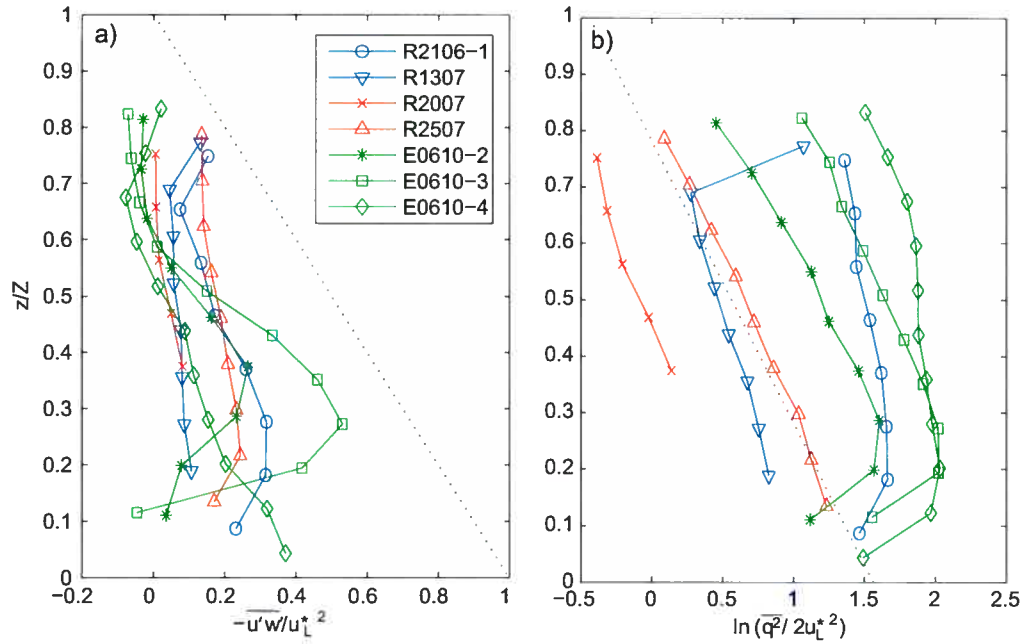


Figure 4.19 – Profils normalisés par  $u_L^{*2}$  des a) cisaillements de Reynolds et b) énergie cinétique turbulente. Les profils en bleu sont ceux recueillis dans un écoulement uniforme avec rides, en rouge, en présence de dunes et en vert dans un écoulement qui accélère et décélère dans une mouille.

Dans un écoulement uniforme à surface libre, les cisaillements de Reynolds normalisés,  $-\overline{u'w}/u^{*2}$ , devraient avoir une valeur nulle à la surface et augmenter

linéairement jusqu'à une valeur de 1 près du lit (Nezu et Nakagawa, 1993). Les profils de cisaillement de Reynolds mesurés par le PC-ADP dans les différents environnements fluviaux ne suivent pas ce profil théorique et sont tous inférieurs à la valeur attendue (figure 4.19(a)). Les résultats du chapitre précédent avaient démontré que le PC-ADP sous-estimait les cisaillements de Reynolds par rapport à l'ADV, ce qui explique les valeurs de cisaillements plus faibles. La variabilité peut être expliquée par les différentes conditions d'écoulement. Les deux profils recueillis au centre de la mouille présentent la même caractéristique, la valeur maximale des cisaillements est atteinte à  $0.28Z$  et à  $0.38Z$ . La présence de la couche de cisaillement à l'intérieur de la mouille explique la forme de ces profils. Les cisaillements de Reynolds des séries R1307 et E0610-4 suivent approximativement un profil linéaire. Ces mesures ont été recueillies dans des écoulements uniformes, le premier dans un écoulement au-dessus de rides d'une rugosité relative de 0.019 et le second dans une mouille à l'aval de la zone de séparation. Les profils des mesures R2106-1 et R2507 ont la même forme, caractérisée par une augmentation des cisaillements vers le lit suivie d'une diminution à  $\sim 0.1Z$ . Ces mesures ont été recueillies dans des écoulements uniformes au-dessus de rides (rugosité relative de 0.029) et de dunes (rugosité relative de 0.05 à 0.1). Pour les profils des mesures recueillies dans la mouille (E0610-2, E0610-3, E0610-4), le cisaillement est négatif près de la surface. Dans les profils mesurés au dessus de rides, le cisaillement augmente près de la surface, ce qui pourrait être causé par la modification de l'écoulement par l'appareil. Les mesures dans les écoulements en séparation verticale et à l'entrée de la mouille ne sont pas présentées à la figure 4.19 parce qu'elles présentaient un profil des cisaillements de Reynolds complètement différent. Les valeurs de cisaillement de Reynolds augmentaient en se rapprochant de la surface (voir figure 4.13).

Les profils d'énergie cinétique turbulente se rapprochent davantage des profils théoriques que les cisaillements de Reynolds. L'énergie cinétique turbulente normalisée est reliée à la profondeur :  $\overline{q^2}/2u^{*2} = 4.78 \exp(-2z/Z)$  (Nezu et Nakagawa, 1993). Présenté sous forme semi-logarithmique, le profil théorique de l'énergie cinétique turbulente suit une relation linéaire :  $-0.5 \ln(\overline{q^2}/2u^{*2}) + \ln(4.78)/2$  (dans la

figure 4.19(b) en pointillé). L'énergie cinétique turbulente se conforme relativement bien au profil théorique mais est généralement plus élevée que la valeur attendue. La forme de ces profils peut être expliquée par les différentes conditions d'écoulement. Tout comme pour les cisaillements de Reynolds, les profils des mesures E0610-2 et E0610-3 atteignent leur maximum dans la zone de cisaillement créée à l'intérieur de la mouille. Les profils des mesures R1307 et R2507 suivent la relation de Nezu et Nakagawa (1993), mais aucune mesure n'est disponible près du lit. Les mesures R2106-1 et E0610-4 au-dessus de rides et dans la mouille ont des valeurs d'énergie cinétique turbulente plus faibles que celles attendues dans un écoulement uniforme dans le premier 10 % au-dessus du lit.

### 4.3 Séquence avec les dunes mobiles

Une séquence où le lit de la rivière change dans le temps a été recueillie pour tester la capacité du PC-ADP à mesurer des séries temporelles non stationnaires. Le PC-ADP a été déployé sur un site de profondeur d'environ 40 *cm* où se trouvaient des dunes de 5 *cm* de hauteur et de longueur d'onde de 75 *cm*. Les dunes qui se déplacent relativement vite occupent donc près de 13% de la profondeur de l'écoulement. La série de vitesses d'une durée totale de 1 heure a été découpée en quatre sections de 15 minutes. Des quantités moyennes de l'écoulement de chacune de sections peuvent être ainsi estimées. Le PC-ADP a été aligné par rapport à la verticale à des angles plus petits que  $1^\circ$ .

La position du lit peut être déterminée par le rapport signal-à-bruit mesuré par les trois faisceaux. Le profil moyen du rapport signal-à-bruit atteint un pic à des valeurs supérieures à 80 *dB* lorsque les faisceaux rencontrent le lit de la rivière. On observe à la figure 4.20 que le pic de la valeur maximale du rapport signal-à-bruit se déplace vers l'appareil dans le temps. La position du lit change donc de 5 *cm* entre le début et la fin de la séquence. Nous avons donc un profil de cinq cellules pour les deux premières sections et de quatre cellules pour les deux dernières. Les trois faisceaux ne perçoivent pas le lit de la rivière en même temps. Les faisceaux 2

et 3 sont orientés perpendiculairement à l'écoulement en amont du faisceau 1, qui est orienté avec la direction de l'écoulement. Puisque la dune se déplace dans le sens de l'écoulement, les faisceaux 2 et 3 enregistrent le changement de profondeur avant le faisceau 1.

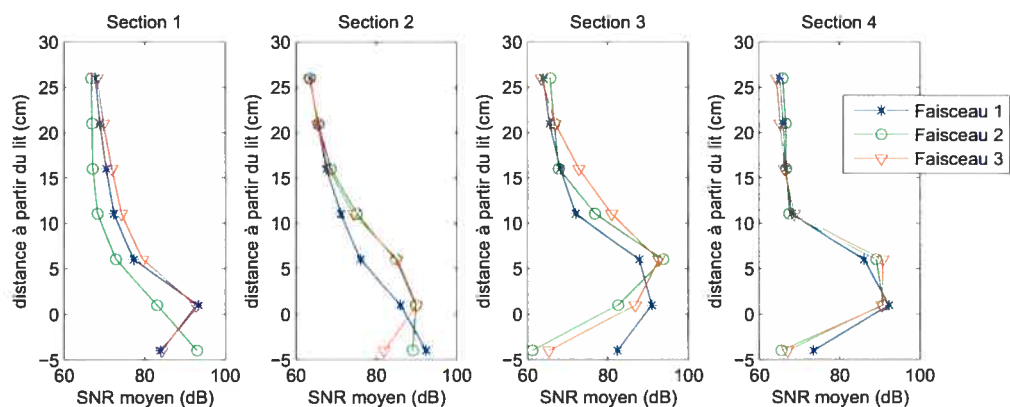


Figure 4.20 – Rapport signal-à-bruit de chacune des sections consécutives d'une durée de 15 minutes. Le PC-ADP a échantillonné un profil de 7 cellules de 5 cm à 2 Hz. Nous avons fixé la longueur maximale du profil,  $r_{max}$ , à 71 cm et de 10 à 11 échantillons de vitesse sont utilisés par mesure.

La moyenne du rapport signal-à-bruit des trois faisceaux est présentée en fonction du temps à la figure 4.21a. Les rapports signal-à-bruit supérieurs à 80 dB indiquent la présence du lit. À la fin de la deuxième section, près du lit, le SNR augmente graduellement, ce qui indique l'arrivée du front de la dune. La force du signal réfléchi, qui est fonction des propriétés de l'instrument et de l'écoulement, est souvent utilisé comme indice pour estimer la concentration de sédiments en suspension (e.g. Kostachuk *et al.*, 2005). Sur les images du rapport signal-à-bruit, on note la présence de zones qui couvrent toute la tranche d'eau où le SNR est plus élevé. Ces zones correspondent à un plus grand nombre de particules en suspension. Ces nuages de particules en suspensions reflètent probablement l'entraînement des sédiments par les méga-tourbillons (*kolks*) (Kostaschuk et Church, 1993).

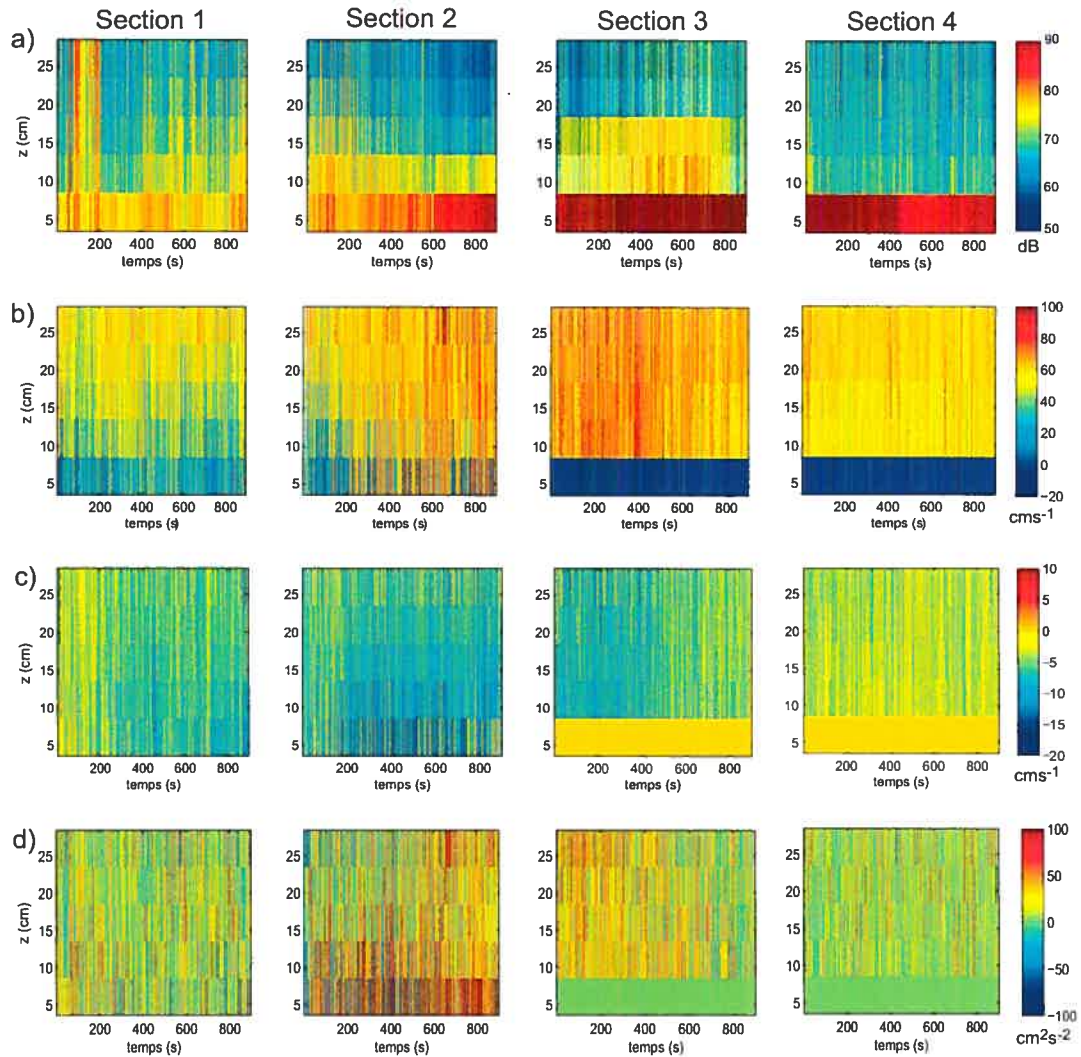


Figure 4.21 – a) Rapport signal-à-bruit, b) vitesse longitudinale, c) vitesse verticale et d)  $-u'w'$ , cisaillement de Reynolds instantané pour chacune des quatre sections de 15 minutes de la séquence de l'écoulement au-dessus de la dune mobile.

Afin de voir l'effet du passage de la dune, nous examinerons ici les composantes longitudinale et verticale de l'écoulement (figure 4.21b) et c)). Les séries de vitesse des sections 1 et 4 sont stationnaires (testées avec le *runtest*), tandis que celles des sections 2 et 3 sont influencées par le déplacement de la dune. Sur le dos de la dune, à la fin de la section 2 et au début de la section 3, on note une accélération de l'écoulement pour la composante longitudinale sur toute la tranche d'eau. À la fin de la section 3, la vitesse diminue mais demeure cependant plus élevée que celle

mesurée au début de la séquence dans la section 1. Pour la composante verticale, elle est généralement négative, orientée vers le lit de la rivière. Les valeurs maximales sont atteintes dans la section 2, soit tout juste devant le front de déplacement de la dune. La composante verticale de l'écoulement atteint des vitesses près de zéro dans la section 4.

Au milieu de la section 2 et au début de la section 3, les vitesses longitudinales et verticales atteignent leur valeur maximale. La figure 4.21d représente le produit des fluctuations de vitesses longitudinales et verticales instantanées. Les fluctuations de vitesses sont estimées en enlevant la tendance et la moyenne de chacune des sections. La zone en rouge représente les instants où  $-u'w'$  a une valeur élevée et positive. Un  $-u'w'$  positif indique la présence d'événements des quadrants II ( $u' < 0$ ,  $w' > 0$ ) et IV ( $u' > 0$ ,  $w' < 0$ ). Les événements des quadrants II et IV sont concentrés dans les sections 2 et 3, zone qui correspond au moment où la profondeur change suite au passage de la dune.

La figure 4.21 nous dresse donc un portrait nouveau de la zone dynamique en aval d'une dune. Elle présente une synthèse qui relie l'information sur la quantité de sédiments en suspension, les vitesses longitudinale et verticale et les contraintes de cisaillement présentes dans l'écoulement. Dans la section 2, nous observons clairement la transition qui affecte simultanément les quatre paramètres de l'écoulement. L'écoulement commence à accélérer et les cisaillements de Reynolds nous indiquent que la turbulence y est plus élevée. Le rapport signal-à-bruit des mesures du PC-ADP dans cette section nous révèle la mise en suspension des sédiments à cet endroit.

À partir de ces observations, nous pouvons tenter de situer approximativement les mesures du PC-ADP par rapport à la position de la dune. La figure 4.22 représente une synthèse récente de l'écoulement autour d'une dune (Best, 2005). Les mesures de la section 1 se retrouvent dans la couche-limite interne en bas de profil et dans la zone de *wake* en haut du profil. La couche-limite interne est située à l'aval de la zone de réattachement et est caractérisée par un profil de vitesse plus logarithmique (Best, 2005). Les mesures de la section 2 sont situées dans la zone de

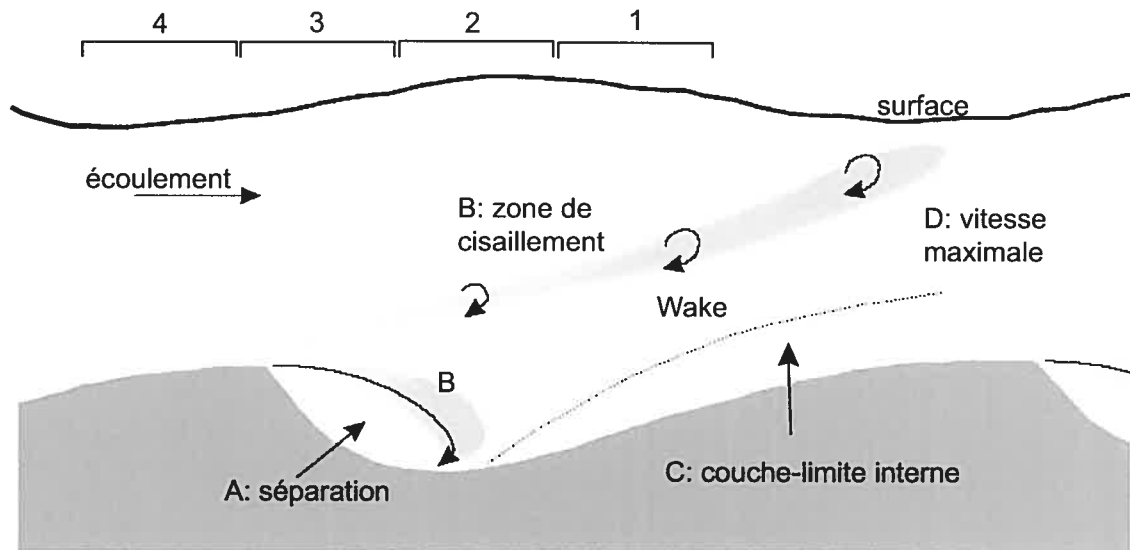


Figure 4.22 – Représentation schématique de l'écoulement divisé en quatre zones (A, B, C, D et E) au dessus d'une dune (modifié de Best (2005)). La description de ces zones est présentée dans le texte. Les teintes de gris dans les zones de cisaillement représentent un plus grand nombre de particules en suspension. Les mesures de PC-ADP divisées en quatre sections sont situées sur ce schéma.

cisaillement, ayant de vitesses verticales négatives, des cisaillements de Reynolds plus élevés. Cette zone de cisaillement est générée en bordure de la zone de recirculation de l'écoulement. De la turbulence à grande échelle y est générée sous la forme d'instabilités Kelvin-Helmoltz qui se dissipent vers l'aval dans la zone de *wake*. Les événements de taux de sédiments en suspension plus élevés qui occupent toute la tranche d'eau se retrouvent donc dans la zone de l'écoulement où les méga-tourbillons (*kolks*) sont présents, c'est-à-dire, dans les sections 1 et 2. La fin de la section 2 et le début de la section 3 se retrouvent sur la crête de la dune, région caractérisée par une accélération de la vitesse de l'écoulement. La section 4 se situe sur le dos de la dune où les vitesses sont légèrement moins élevées qu'au-dessus de la crête.

La figure 4.23 présente les profils de vitesses longitudinales moyennes. Les profils s'écartent du profil semi-logarithmique observé dans le cas des écoulements uniforme, à cause de l'accélération et de la décélération de l'écoulement près de la

dune. Ces profils nous permettent tout de même d'obtenir les valeurs de vitesse de cisaillement pour chacune des sections. Les vitesses de cisaillement des deux premières sections (8 et 7  $\text{cms}^{-1}$ ) sont supérieures à celles des deux dernières (1 et 2  $\text{cms}^{-1}$ ). Cependant, puisque l'écoulement est peu profond, seulement quatre cellules sont disponibles pour tracer le profil et effectuer la régression linéaire dans le cas des sections 4 et 5. Les valeurs estimées de vitesses de cisaillement sont à interpréter avec précaution dû à l'absence de points de mesures près du lit. Ces valeurs de vitesses de cisaillement estimées à partir des profils de vitesses logarithmiques seront donc être comparées plus loin avec celles estimées à partir des profils de cisaillement de Reynolds.

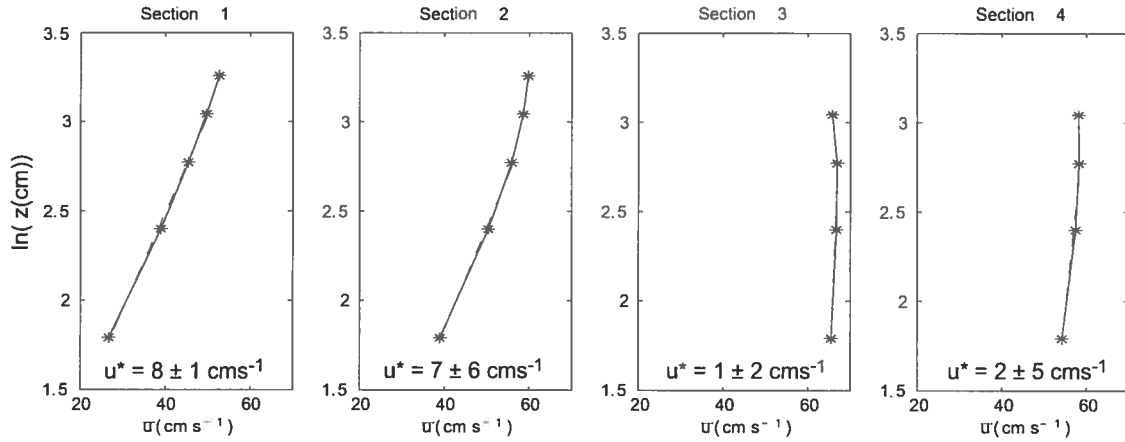


Figure 4.23 – Profils semi-logarithmiques des vitesses longitudinales moyennes pour chacune des sections.

L'effet du passage de la dune est visible sur ces profils de vitesses moyennes. Dans la première section, le profil est logarithmique, les vitesses moyennes varient de 26  $\text{cms}^{-1}$  près du lit à 52  $\text{cms}^{-1}$  près de la surface. Le profil est logarithmique, ce qui est cohérent avec l'idée que la région près de lit se situe dans la couche-limite interne. Dans la deuxième section, la vitesse moyenne est plus élevée que dans la première section, atteignant des valeurs de 39  $\text{cms}^{-1}$  près du lit et de 60  $\text{cms}^{-1}$  à la surface. Le profil de la section 3 présente des vitesses relativement constantes sur la tranche d'eau. Dans la quatrième section, l'écoulement décélère par rapport à la section précédente, les vitesses atteignent 54  $\text{cms}^{-1}$  près du lit et 58  $\text{cms}^{-1}$  près



de la surface. Les profils de vitesses des deux dernières sections sont typiques des écoulements en accélération sur le dos de la dune (Nelson *et al.*, 1993).

Les profils des cisaillements de Reynolds moyens présentent des différences entre les sections qui composent la séquence de l'écoulement au-dessus de la dune mobile (figure 4.24). Les cisaillements de Reynolds sont plus élevés dans la deuxième section et présentent un profil dont la valeur maximale est atteinte près du lit. La cellule à 5 *cm* du lit se retrouve à l'aval de la crête de la dune directement dans la zone de cisaillement (voir figure 4.22), ce qui explique les cisaillements de Reynolds très élevés. Le profil de la section 3 a sensiblement la même forme que celui de la section 2 mais avec des valeurs de cisaillement de Reynolds moins élevées, notamment près du lit. Les valeurs de la section 1 et 4 sont les plus faibles mais la forme des profils est différente. Le profil de la section 4 est constant sur toute la tranche d'eau, tandis que dans celui de la section 1 les cisaillements augmentent en se rapprochant du lit jusqu'à la hauteur de 10 *cm* et diminuent ensuite dans la dernière cellule.

Les profils de cisaillements de Reynolds nous permettent d'obtenir un estimé de la vitesse de cisaillement en utilisant la valeur maximale du profil. Pour la section 1, la vitesse de cisaillement est de  $3.3 \text{ cms}^{-1}$ , ce qui est nettement plus faible que celle estimée par le profil logarithmique de vitesse ( $8 \text{ cms}^{-1}$ ). Les valeurs de  $u^*$  pour la section 2 sont similaires pour les deux méthodes, soit de  $8.7 \text{ cms}^{-1}$  pour la méthode des cisaillements de Reynolds et de  $7 \text{ cms}^{-1}$  pour les profils de vitesses. Les vitesses de cisaillements estimées à partir des cisaillements de Reynolds pour les sections 3 et 4 ( $4.5 \text{ cms}^{-1}$  et  $2.7 \text{ cms}^{-1}$  respectivement) sont plus élevées que celles obtenues à partir des profils de vitesses ( $1 \text{ cms}^{-1}$  et  $2 \text{ cms}^{-1}$ ). L'estimation de  $u^*$  par la méthode des cisaillements de Reynolds nous permet donc de constater que la vitesse de cisaillement est maximale dans la section 2, soit tout juste à l'aval de la crête de la dune.

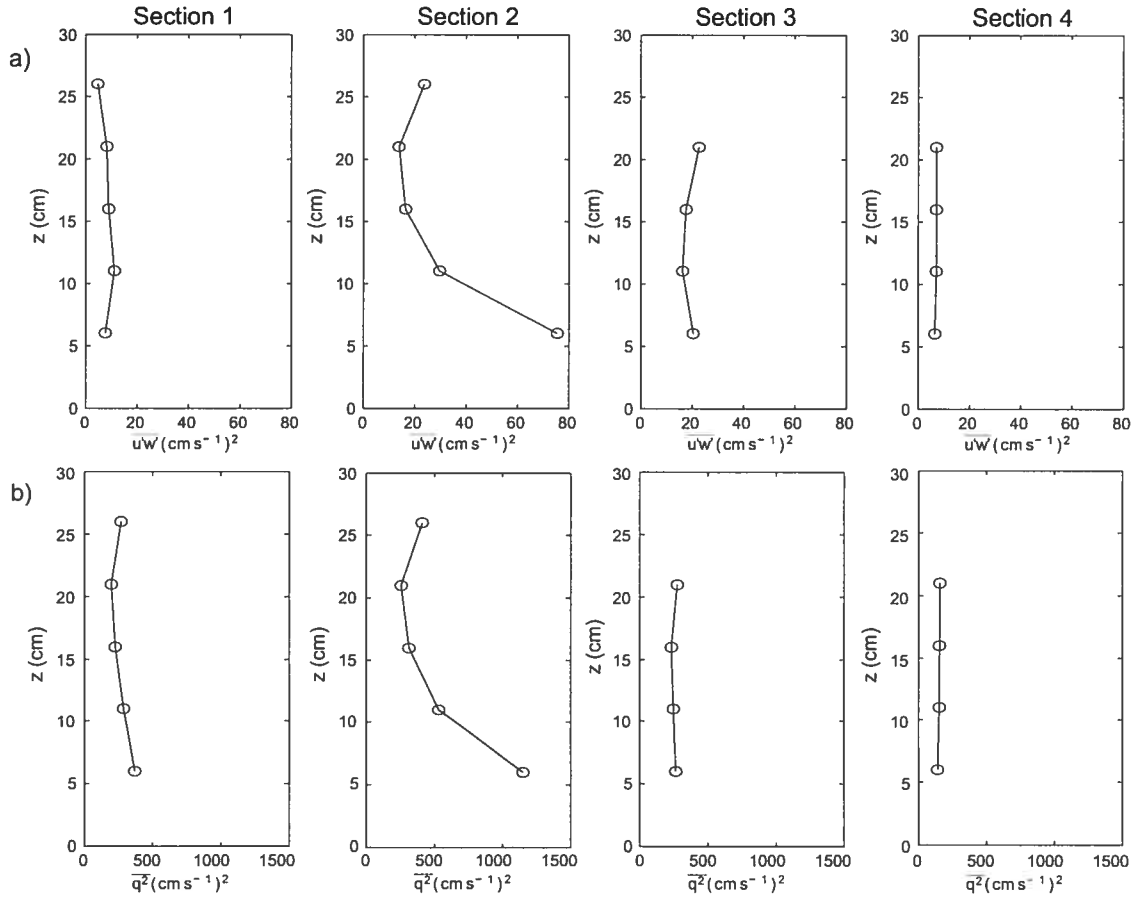


Figure 4.24 – Profils des a) Cisaillements de Reynolds et de b) l'énergie cinétique turbulente estimés en calculant la moyenne de chacune des sections de 15 minutes de la séquence de mesure du PC-ADP au-dessus de la dune mobile.

Les profils d'énergie cinétique turbulente sont également présentés à la figure 4.24. La forme des profils change selon la section mais présente toujours une augmentation de la surface vers le lit. Les valeurs les plus élevées d'énergie cinétique turbulente se retrouvent dans la section 2 dans la zone de *wake*, à l'aval de la dune. Le profil d'énergie cinétique turbulente de la première section se rapproche de celui d'un écoulement uniforme. La troisième et quatrième section présentent le même type de profil, c'est-à-dire une légère augmentation en se rapprochant du lit. Les valeurs d'énergie cinétique turbulente de la section 3, qui se situe au-dessus de la crête de la dune, sont cependant plus élevées que celles de la section 4. L'énergie ci-

nétique turbulente est maximale près du lit dans la section 2, à l'aval de la dune, ce qui correspond à ce qui a été observé pour les profils de cisaillements de Reynolds.

Les valeurs d'énergie cinétique turbulente et de cisaillement de Reynolds dans la dernière cellule du PC-ADP, à 6 *cm* au dessus du lit, sont comparées à celles obtenues dans d'autres études. L'énergie cinétique turbulente par unité de volume,  $TKE = \rho(u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ , et  $\tau_{uw} = -\rho u'w'$  sont utilisés ici pour fin de comparaison. Les valeurs du cisaillement de Reynolds et d'énergie cinétique turbulente obtenues par les mesures de PC-ADP à 6 *cm* du lit présentent la même caractéristique : elles sont maximales tout juste derrière la crête de la dune (figure 4.25).

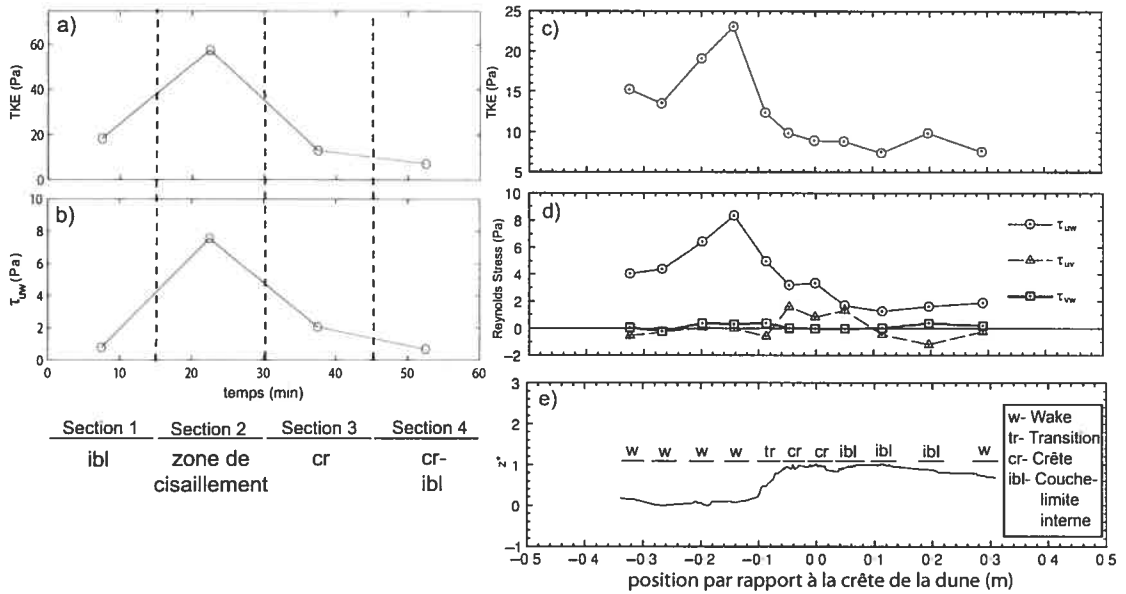


Figure 4.25 – a) Énergie cinétique turbulente par unité de volume et b) cisaillements de Reynolds à 6 *cm* au dessus du lit estimés en calculant la moyenne de chacune des sections de 15 minutes. c) Énergie cinétique turbulente, d) cisaillement de Reynolds et e) position des mesures d'ADV (d'une longueur de 17 minutes) recueillies dans un écoulement de 1.5 *m* de profondeur et d'un vitesse moyenne de 0.7 *ms*<sup>-1</sup> par Venditti et Bauer (2005). La hauteur  $z^*$  est normalisée par la hauteur de la dune, soit de 32 *cm*.

Ces résultats sont similaires à ceux présentés par Venditti et Bauer (2005) qui ont mesuré des vitesses de l'écoulement au-dessus d'une dune à l'aide de mesures d'ADV à une fréquence de 4 Hz et à ceux de Bennett et Best (1995) et Venditti et

Bennett (2000) obtenus en laboratoire. Les valeurs des cisaillements de Reynolds moyens sont comparables à celles estimées par Venditti et Bauer (2005) même si leurs mesures ont été faites au-dessus de dunes plus hautes dans un écoulement plus profond et plus rapide ( $Z = 1.18 \text{ m}$  et  $\bar{u} = 70 \text{ cms}^{-1}$ ) que celui étudié ici. Les mesures de PC-ADP en aval de la dune (section 1 et 2) se situent plus près du lit que celles de Venditti et Bauer (2005) qui ont été effectuées à 32 cm au dessus du lit (hauteur qui correspond à la hauteur de la dune). Dans le profil de cisaillement de Reynolds de la section 1 (figure 4.24a), la valeur de cisaillement de la cellule 4 (probablement située dans la wake) est supérieure à celle de la cellule 5 près du lit, située dans la couche-limite interne. Les valeurs d'énergie cinétique que nous avons obtenues sont plus élevées que celles de Venditti et Bauer (2005), ce qui est probablement causé par le bruit ajouté par le changement de coordonnées qui tend à augmenter la variance dans les mesures de vitesses du PC-ADP. Les valeurs d'énergie cinétique turbulente et de cisaillement de Reynolds sur la crête de la dune (section 3 et 4) sont plus faibles que celles dans la zone de *wake* tout juste derrière la dune. Dans le profil de cisaillement de Reynolds de la section 1 (figure 4.24a), la valeur de cisaillement de la cellule 4 (probablement située dans la wake) est supérieure à celle près du lit, située dans la couche-limite interne.

Les recherches précédentes en laboratoire et sur le terrain indiquent que l'écoulement au-dessus des dunes est dominé par des mouvements cohérents, tels que des tourbillons. Il semble que ces structures turbulentes soient générées par l'instabilité dans la zone de cisaillement au sommet de la zone de séparation à l'aval de la dune (Bennett et Best, 1995). Nous tenterons de visualiser ces structures turbulentes présentes dans l'écoulement par l'analyse par ondelettes. Les ondelettes *Mexican hat* sont utilisées pour visualiser les spectres d'énergie locaux des profils des quatre sections. La composante verticale de l'écoulement est analysée puisqu'elle est moins affectée par l'hétérogénéité de l'écoulement, tel que nous l'avons montré à la section 3.5. Nous détecterons ainsi les mouvements de l'écoulement qui se dirigent verticalement dans la tranche d'eau. Les spectres d'énergie des transformées par ondelettes représentent la distribution de la variance dans la composante verti-

cale selon les différentes échelles de l'écoulement, représentées par leur période en seconde, à chaque pas de temps.

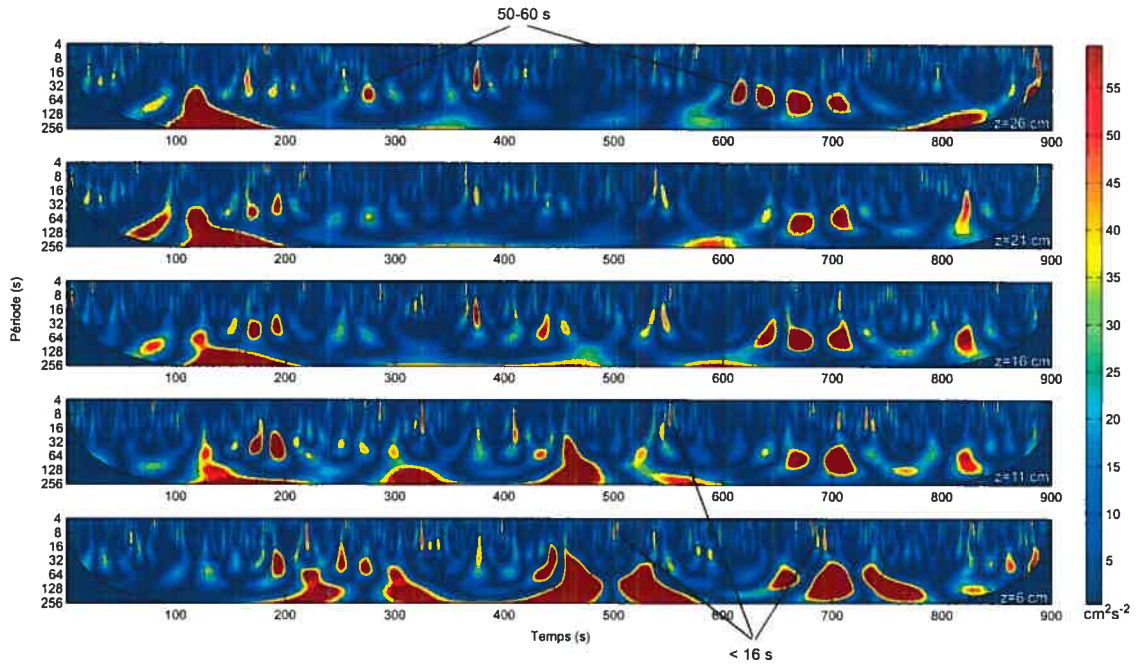


Figure 4.26 – Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement,  $w$ , de la section 1 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des cinq cellules centrées à 6 cm, 11 cm, 16 cm et 26 cm au-dessus du lit. Les structures de période de l'ordre de 50 s et de  $< 16$  s sont indiquées sur la figure.

Dans la section 1, on note la présence intermittente de structures ayant des périodes de l'ordre de 50 s qui contiennent beaucoup d'énergie (figure 4.26). Ces structures se retrouvent dans toute la tranche d'eau mais leur période est plus grande dans les cellules centrées à 6 et 11 cm. Ces deux cellules les plus rapprochées du lit contiennent également plus d'énergie dans les structures de période  $< 16$  s que les cellules dans la partie supérieure de l'écoulement. Nous avons associé cette région de l'écoulement près du lit à la couche-limite interne. La présence de grandes structures de périodes supérieures à 200 secondes sur les spectres d'énergie (également présentes dans les figures 4.27 et 4.28) est probablement attribuable au fait que les séries temporelles ne sont pas tout à fait stationnaires. Le mouvement de la dune tout au long de la durée de la section temporelle induit un lent

changement dans l'écoulement.

Dans la section 2, les spectres d'ondelettes des cellules centrées à 6 et 11 cm du lit sont très différents de ceux des mesures dans la partie supérieure de l'écoulement où on note la présence de structures de périodes d'environ 16 secondes tout au long de la section (figure 4.27). À partir du temps 500, de plus grandes structures (période  $> 128s$ ) apparaissent. Dans la partie inférieure de l'écoulement, qui a été associée à la zone de cisaillement, le signal contient beaucoup plus de variance dans les structures de 30 s et 60 s.

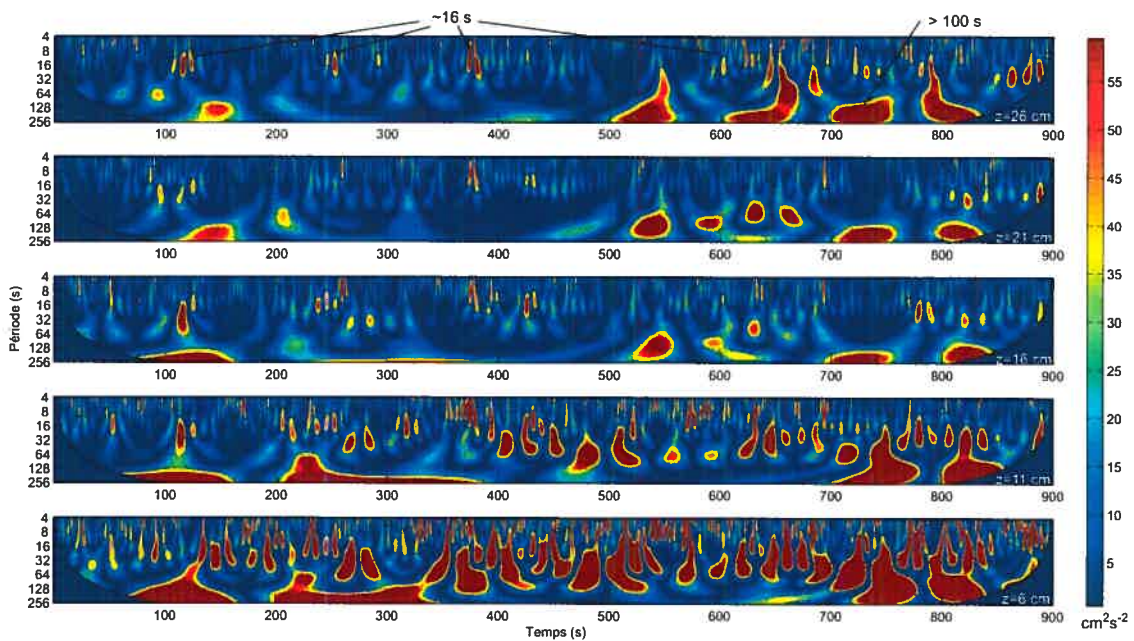


Figure 4.27 – Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement,  $w$ , de la section 2 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des cinq cellules centrées à 6 cm, 11 cm, 16 cm et 26 cm au-dessus du lit. Les structures de période de l'ordre de 16 s et de  $> 100$  s sont indiquées sur la figure.

Dans la troisième section, les grandes structures ( $> 100$  s) ainsi que les petites structures de  $\sim 16$  s qui étaient présentes dans la deuxième moitié de la section 2 sont toujours visibles (figure 4.28). À partir de la septième minute, la variance contenue dans ces grandes structures diminue. On peut penser qu'à partir de ce moment, on se situe à l'amont de la crête de la dune, dans un écoulement plus uniforme et moins dominé par les structures turbulentes de la wake.



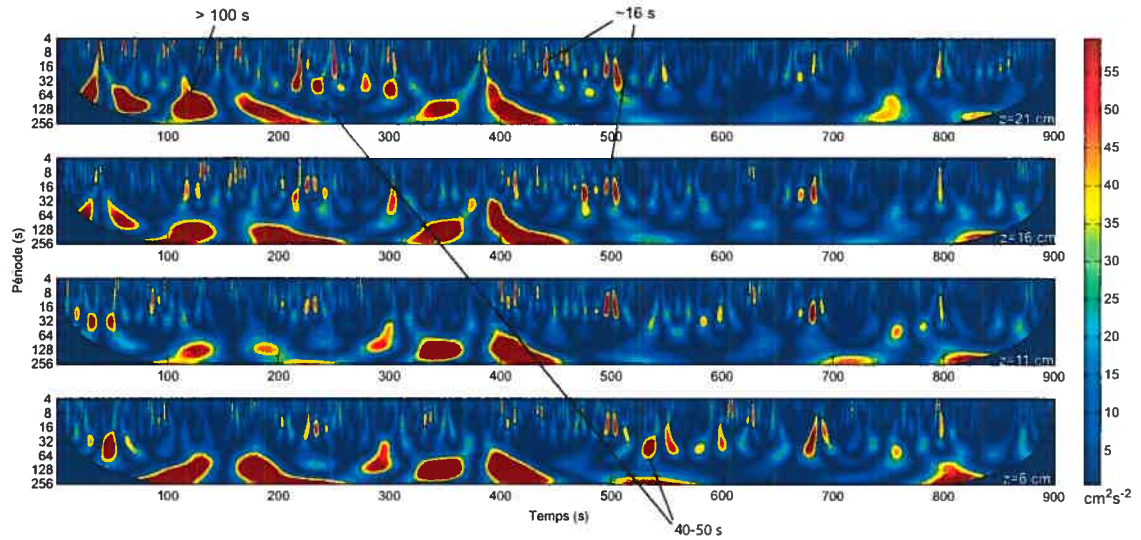


Figure 4.28 – Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement,  $w$ , de la section 3 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des quatre cellules centrées à 6 cm, 11 cm et 16 cm au-dessus du lit. Les lignes pointillées en blanc indique la position des structures ayant une période de 43 et 112 secondes.

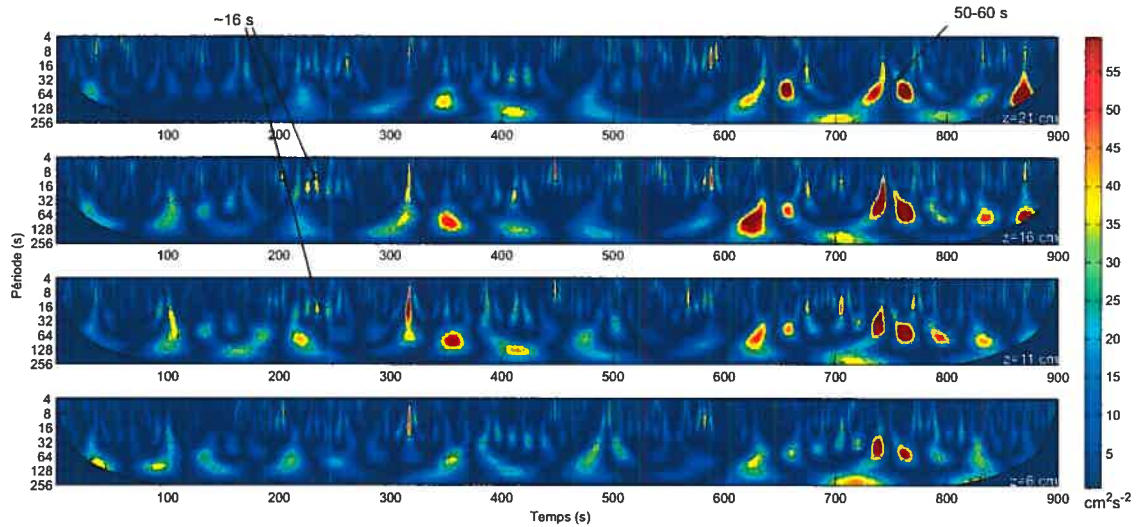


Figure 4.29 – Spectre d'énergie de la composante verticale de l'écoulement,  $w$ , de la section 4 utilisant les ondelettes Mexican Hat pour chacune des quatre cellules centrées à 6 cm, 11 cm et 16 cm au-dessus du lit. Les lignes pointillées en blanc indique la position des structures ayant une période de 67 et 135 secondes.

Dans les 600 premières secondes de la quatrième section, nous retrouvons quelques petites structures de l'ordre de 16 secondes accompagnées de structures de grande taille (période  $\sim 100$  s). À ce moment, les mesures proviennent du dos de la dune tout juste à l'aval de la crête. Par la suite, des structures de 50-60 s apparaissent au fur et à mesure que s'éloigne la crête de la dune du PC-ADP. Ce type de structures ressemblent à celles qui étaient présentes dans la section 1, caractérisée par la couche-limite interne en bas de profil.

La figure 4.30 présente les spectres globaux des quatre sections pour les différentes profondeurs. Pour ces spectres, la moyenne de l'énergie par fréquence est estimée pour la durée entière de chaque section. Parce qu'elles sont mieux localisées en fréquence, nous utilisons ici les ondelettes *Morlet*. Ces spectres permettent d'identifier avec plus de précision la période des structures détectées dans les spectres locaux présentés précédemment. Dans la section 1, le maximum de variance se retrouve à une fréquence de 0.0183 Hz (période de 55 s), ce qui correspond aux structures sur toute la tranche d'eau identifiées à la figure 4.26. Un pic d'énergie à une période de 20 s est également présent pour les cellules centrées à 26, 21, 16 cm du lit. Dans la section 2, on note un pic important à 0.064 Hz (16 s) présent dans les trois cellules du haut qui n'est pas présent dans les deux cellules du bas. Dans la section 3, un pic d'énergie à 0.023 Hz (43 s) est présent sur toute la tranche d'eau. On note également un pic à 0.056 Hz (18 s) pour les cellules centrées à 11, 16 et 6 cm du lit. Dans la section 4, un pic est présent sur toute la tranche d'eau à 0.015 Hz (67 s).

Dans les sections 1, 2 et 3, les spectres de puissance ont donc une caractéristique en commun : un pic d'énergie à des fréquences de 0.05 à 0.064 (périodes de 16 à 20 secondes). Ce pic d'énergie est présent uniquement dans les mesures des trois cellules du haut, ce qui laisse penser que ces structures sont observées dans la zone d'échappement. Ces structures peuvent donc être associées aux méga-tourbillons (*kolks*), qui dans notre cas, auraient une période d'environ 16 s. L'autre type de structure est observée simultanément sur toute la tranche d'eau dans les sections 1 et 4, à des périodes de 55 et 67 s et pourrait être relié à la dynamique de la



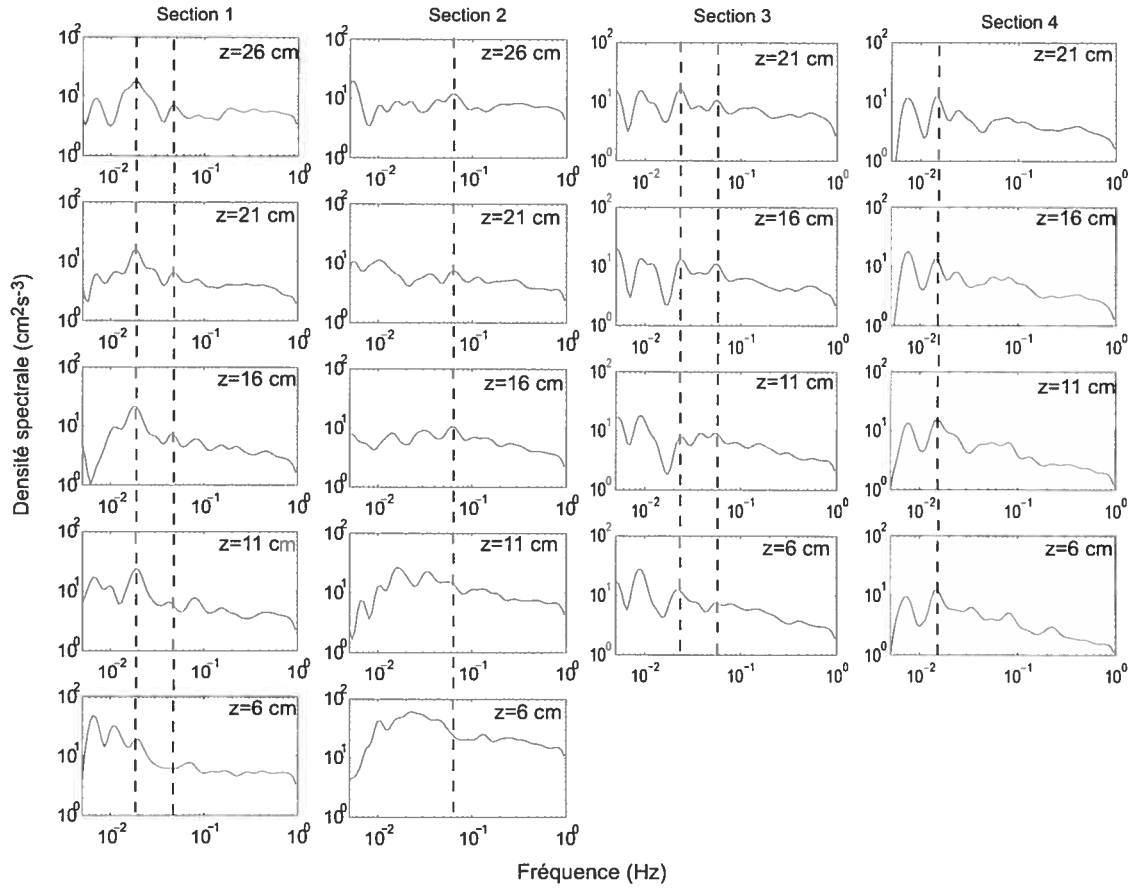


Figure 4.30 – Spectres globaux d'énergie de la vitesse verticale,  $w$ , pour les 4 sections et toutes les cellules au dessus du lit.

couche-limite interne près du lit. Ceci indique la présence de structures turbulentes à très grandes échelles ou d'écoulement secondaire marqué, ce qui est peu probable compte tenu du contexte de nos mesures.

Les structures turbulentes telles les méga-tourbillons peuvent aller jusqu'à interférer avec la surface sous forme de bouillons (*boils*) (Jackson, 1976). La fréquence des bouillons à la surface est liée à la rugosité relative des dunes (hauteur de la dune/profondeur de l'écoulement). À partir d'une synthèse de plusieurs études, Babakiaïff et Hickin (1996) ont avancé que les bouillons sont plus fréquents et interagissent plus fortement avec la surface lorsque la hauteur de la dune occupe une plus grande portion de l'écoulement. La rugosité relative de la dune étudiée ici est

de 0.125. Pour des dunes d'une même rugosité relative, les résultats de Jackson (1976) ont montré que la période des bouillons à la surface est de 16 à 22 secondes. Cette fréquence est similaire à nos observations. On peut penser que les structures turbulentes de périodes allant de 16 à 20 secondes que nous avons identifiées dans les spectres et qui sont présentes dans la partie supérieure de l'écoulement vont interagir avec la surface sous la forme de bouillons. L'énergie contenue dans ces structures est plus grande dans le cas des sections 2 et 3 qui se retrouvent tout juste à l'aval de la crête de la dune.

En résumé, le test du PC-ADP dans un environnement comportant des dunes mobiles s'avère très concluant. Les différentes zones de l'écoulement autour de la dune ont pu être identifiées. Les quantités turbulentes moyennes, tels les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente estimées pour chacune des régions concordent avec celles obtenues dans la littérature. L'analyse par ondelettes nous permet de décomposer les séries de vitesses mesurées et d'estimer la taille des structures présentes dans l'écoulement autour de la dune. Nos résultats montrent la dominance de structures à très grande échelle dans la zone de *wake* et dans la portion supérieure de la tranche d'eau.

#### 4.4 Conclusions et recommandations

Dans ce chapitre, nous avons testé la performance du PC-ADP dans des milieux couvrant une gamme de conditions d'écoulement (vitesse moyenne, intensité turbulente) et de rugosité. Les conditions du lit couvrent des lits sablonneux avec rides et dunes, dont certaines en mouvement et de lits graveleux où l'on a des blocs et une morphologie de mouille marquée. Les conditions d'écoulement sont aussi très diverses, allant de l'écoulement uniforme à des zones de séparation derrière un banc d'accumulation et derrière un large bloc en passant par une transition de décélération et d'accélération du fluide dans une mouille. L'objectif de cette étude était de déterminer le potentiel du PC-ADP à mesurer la turbulence dans ces différents milieux. Ces tests nous ont permis d'établir que :

1. Le PC-ADP donne des valeurs raisonnables de la vitesse de cisaillement. L'incertitude sur la vitesse de cisaillement obtenue à partir du profil semi-logarithmique de la vitesse moyenne est en moyenne de 33%. Cependant, ce pourcentage d'erreur n'inclut pas l'erreur associée au manque de données dans la portion qui couvre le premier 20% près du lit (Biron *et al.*, 1998). Même si la vitesse moyenne mesurée par le PC-ADP est plus fiable que les cisaillements de Reynolds, la technique d'estimation de  $u_R^*$  à partir de ceux-ci peut être utilisée pour valider la valeur de  $u_L^*$ . Il faut cependant tenir compte que l'estimation de la vitesse de cisaillements de Reynolds est également affectée par le manque de données près du lit, où la valeur maximale est généralement atteinte (Biron *et al.*, 2004).
2. Deux facteurs limitent sérieusement les mesures près du lit : l'interférence entre les impulsions acoustiques de l'appareil et la présence du lit à l'intérieur du volume d'échantillonnage d'une cellule. Généralement, il est assez difficile d'obtenir des mesures de qualité dans les premiers 10 *cm* au-dessus du lit. Comme la zone près du lit est souvent critique notamment pour le transport de sédiments et les applications écologiques, cette limite du PC-ADP peut s'avérer très sévère pour des études en milieu peu profond.
3. Le PC-ADP semble fournir une estimation raisonnable des valeurs d'énergie cinétique turbulente. Dans la section précédente nous avons évalué que l'énergie cinétique turbulente est surestimée par rapport aux mesures d'ADV à la même fréquence d'échantillonnage. L'ajout de bruit dans les mesures suite au changement de coordonnées semble s'effectuer dans une proportion qui ne dépend pas de la distance par rapport à l'appareil. Les profils d'estimés d'énergie cinétiques turbulente fournies par le PC-ADP dans les différents environnements semblent bien représenter la dynamique de l'écoulement.
4. Les profils normalisés des cisaillements de Reynolds,  $-\overline{uw}/u^{*2}$ , ne suivent pas toujours la relation linéaire attendue et la vitesse de cisaillement ne peut pas être estimée en extrapolant le profil. La vitesse de cisaillement peut être

évaluée en utilisant la valeur du cisaillement de Reynolds qui est maximale entre  $z = 0.1Z$  et  $z = 0.3Z$ . Cependant, cette méthode demande une mesure de PC-ADP de bonne qualité près du lit. L'inhomogénéité de l'écoulement près du lit réduit la corrélation entre les composantes  $u$  et  $w$  de la vitesse. Si on souhaite évaluer la valeur du cisaillement de Reynolds près du lit, une nouvelle approche à tester serait de placer l'appareil plus près du lit afin de réduire la distance entre le lit et l'appareil et ainsi la distance entre les faisceaux. Cependant, cette approche entraînerait la perte de données dans une grande proportion de l'écoulement. Le PC-ADP, placé sur le lit de la rivière et sondant la tranche d'eau vers le haut ne permettrait pas d'obtenir des données plus fiables. Ceci est dû au fait que le PC-ADP utilise une zone tampon de 10 cm près de l'appareil où aucune mesure de vitesse n'est effectuée. De plus, la présence physique de l'appareil, qui serait complètement immergé, pourrait modifier l'écoulement près du lit.

5. L'ajustement du délai entre les impulsions,  $r_{max}$  (appelé *Profiling lag* par la compagnie Sontek), est crucial afin d'éviter l'interférence entre les impulsions qui entraîne la perte de mesures pour les cellules près du lit. Si une zone où la corrélation de moins de 25% est observée près du lit, une augmentation de  $r_{max}$  déplace la zone affectée vers la surface. Ainsi, la vitesse dans les premières cellules près du lit pourra être mesurée.
6. Le PC-ADP peut mesurer les vitesses de l'écoulement dans des environnements où la profondeur change dans le temps. Le rapport signal-à-bruit permet d'identifier la position du lit. L'analyse par ondelettes permet d'obtenir des informations sur la taille des structures présentes dans un écoulement non stationnaire.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

La comparaison des mesures de PC-ADP avec l'ADV ainsi que les déploiements de l'appareil dans différents milieux fluviaux nous ont permis d'évaluer le potentiel du PC-ADP pour mesurer la turbulence en rivière peu profonde. Nous avons identifié de multiples sources d'erreur reliées à la mesure des vitesses par les ADP et plusieurs aspects techniques qui limitent l'utilisation des PC-ADP. La comparaison des mesures obtenues avec un PC-ADP et d'un ADV nous a permis d'évaluer les effets du plus grand volume d'échantillonnage et du changement de coordonnées dans un écoulement hétérogène. Un algorithme de détection et de résolution des erreurs d'ambiguïté a été développé afin d'augmenter la vitesse maximale pouvant être mesurée avec l'appareil. Finalement, la performance du PC-ADP a été évaluée dans différentes conditions d'écoulement et de morphologie du lit.

La proportion de bruit dans les mesures est grandement liée à l'ajustement des paramètres d'échantillonnage du PC-ADP et au traitement des données. Suite à notre étude, nous recommandons d'utiliser en rivière peu profonde des cellules de 5 à 9 *cm* et une fréquence d'échantillonnage de 1 à 2 Hz afin que chaque mesure de vitesse corresponde à la moyenne de plus de 10 échantillons de vitesses. Le bruit Doppler présent dans chaque mesure individuelle de vitesse est ainsi compensé par le nombre de mesures de vitesses qui seront effectuées à l'intérieur du volume d'échantillonnage correspondant à une cellule. En ajustant la taille des cellules et la fréquence d'échantillonnage du PC-ADP, nous devons chercher un compromis entre la résolution spatiale et la proportion de bruit Doppler dans les mesures. L'autre paramètre d'échantillonnage crucial pour l'obtention de données de qualité avec le PC-ADP est le délai entre les impulsions,  $r_{max}$  (appelé *Profiling lag* par la compagnie Sontek). Ce délai doit être ajusté afin d'éviter des zones où le pourcentage de corrélation est diminué par l'interférence entre les impulsions. En augmentant  $r_{max}$ , la position de la zone du profil affectée par les réflexions des signaux sur le lit se déplace vers le haut du profil. Ceci nous permet d'obtenir des mesures de vitesse près du lit de meilleure qualité. Cependant, la valeur de  $r_{max}$  a un effet sur la vitesse

maximale qui peut être mesurée. Plus ce délai est grand, plus la vitesse maximale mesurée sans ambiguïté est faible (Lhermitte et Serafin, 1984). L'algorithme de résolution des erreurs d'ambiguïté de Lacy et Sherwood (2004) que nous avons modifié nous permet d'augmenter la vitesse maximale pouvant être mesurée par la PC-ADP. Le fait d'augmenter la vitesse maximale mesurée sans ambiguïté ne permet pas seulement de mesurer dans des écoulements plus rapides, mais surtout de donner la possibilité d'augmenter le délai entre les impulsions lorsque l'interférence entre les impulsions contamine la région du profil près du lit.

La principale limite de l'utilisation du PC-ADP concerne le postulat de l'homogénéité de l'écoulement lors du changement de coordonnées. La vitesse dans un écoulement turbulent n'est pas homogène horizontalement à l'intérieur du volume sondé par les trois faisceaux du PC-ADP. Cependant, si les propriétés statistiques de l'écoulement le sont, les vitesses moyennes peuvent être calculées à partir des vitesses radiales mesurées par les ADP (Lu et Lueck, 1999a). Dans les écoulements uniformes sondés dans cette étude, les propriétés statistiques semblaient être homogènes puisque les vitesses moyennes dans les composantes longitudinale, latérale et verticale étaient mesurées de façon adéquate par le PC-ADP. Nous avons estimé l'erreur sur la vitesse longitudinale moyenne à 3% et, à partir de tests en laboratoire, Nystrom (2001) avait évalué que les ADP mesuraient les vitesses moyennes avec une erreur de  $\pm 1 \text{ cms}^{-1}$ . Cependant, dans le cas d'écoulements complexes et près des berges du chenal on doit interpréter les vitesses moyennes mesurées par le PC-ADP avec précaution (Tilston et Biron, sous presse). L'inhomogénéité affecte davantage l'amplitude des fluctuations de vitesses dans le système de coordonnées cartésiennes en y ajoutant du bruit. Afin de contourner ce problème pour les vitesses en coordonnées cartésiennes, la technique de la variance, introduite par Lohrmann *et al.* (1990), est largement utilisée pour estimer les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente (e.g. Stacey *et al.*, 1999a,b; Lu et Lueck, 1999b; Lu *et al.*, 2000; Rippeth *et al.*, 2002; Simpson *et al.*, 2004). Cette technique, qui nécessite un ADP à quatre faisceaux, fait intervenir directement la variance des vitesses radiales dans le calcul de ces deux quantités et évite d'effectuer le changement de

coordonnées. Cependant, une telle opération n'est pas possible lorsque l'on utilise un ADP à trois faisceaux comme celui que nous avons testé. Une quantité comme l'énergie cinétique turbulente radiale,  $q_{rad}^2$ , définie comme la somme des variances des vitesses radiales ne fait pas intervenir le changement de coordonnées. Cependant, elle représente une quantité unique à un ADP à trois faisceaux inclinés de  $15^\circ$  par rapport à la verticale. Pour estimer les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente, on doit nécessairement avoir recours à un changement de coordonnées. La comparaison avec des mesures d'ADV nous a permis de montrer que les cisaillements de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente sont respectivement sous-estimés et surestimés dû à l'effet du changement de coordonnées dans un écoulement hétérogène. Cependant, les mesures de PC-ADP dans la gamme d'environnements testés a tout de même permis d'obtenir des profils des cisaillements de Reynolds et d'énergie cinétique turbulente typiques de ce que l'on rencontre dans ces milieux.

Le grand avantage du PC-ADP est de pouvoir mesurer des profils de vitesses instantanées dans les trois dimensions sur toute la tranche d'eau. Cependant, cet avantage a un prix : la résolution spatiale et temporelle des ADP est plus faible que celle des sondes ponctuelles. Étant donné que le PC-ADP échantillonne à une fréquence maximale de 2 Hz, et que la taille des cellules est de 5 à 9 cm, il ne permet pas de résoudre les plus petites échelles de l'écoulement. Dans ce travail, nous avons examiné l'effet du plus grand volume d'échantillonnage sur les mesures de turbulence. Nous avons comparé les mesures du PC-ADP avec celles de l'ADV que nous avons filtrées et ré-échantillonnées à 1 Hz afin d'exclure l'effet de la différence de fréquence d'échantillonnage dans la comparaison. Les résultats qui proviennent de la comparaison entre le PC-ADP et l'ADV concordent avec ceux de Nystrom (2001). La mesure de vitesses à l'intérieur d'un plus grand volume d'échantillonnage des cellules du PC-ADP avait pour effet de réduire la variance des vitesses radiales. Cette perte de variance se retrouve surtout dans les plus hautes fréquences (de 0.1 Hz à 0.5 Hz) et se répercute dans les trois composantes de vitesse mesurées par le PC-ADP. De plus, la faible fréquence d'échantillonnage affecte les fluctuations

de vitesses mesurées par le PC-ADP. L'estimation des fonctions d'autocorrélation, des valeurs de l'*ITS* et des spectres d'énergie dans les hautes fréquences nécessite une haute résolution temporelle qui ne peut être réalisée avec le PC-ADP. Une telle conclusion a également été formulée par Nystrom (2001) et Muste *et al.* (2004a).

Même si le PC-ADP ne peut résoudre toutes les échelles de l'écoulement, la majorité de l'énergie contenue dans les grandes structures turbulentes est captée de façon adéquate. Le PC-ADP est facilement déployé et peut échantillonner pour de longues périodes de temps. Barua et Rahman (1998) a utilisé un ADP dans une rivière tressée afin de détecter les périodes des structures cohérentes dans l'écoulement à l'aide d'analyse spectrale. Tilston (2006) a détecté des structures de haute et basse vitesse près d'une zone de séparation dans une boucle de méandre. Les mesures de PC-ADP dans une zone de recirculation, à l'aval d'un banc d'accumulation, nous ont très clairement révélé la présence de mouvements horizontaux à grande échelle qui occupent toute la tranche d'eau. Dans l'écoulement au-dessus de la dune mobile, nous avons montré que les mesures de PC-ADP jumelées à des analyses par ondelettes permettent également d'identifier les structures turbulentes. Ces résultats sont très prometteurs puisqu'ils montrent que le PC-ADP peut contribuer à l'étude des écoulements non stationnaires et des structures turbulentes intermittentes dans l'écoulement. Dans de telles études, nous devons par contre nous concentrer sur des échelles temporelles supérieures à  $\sim 10$  s, puisque les fluctuations de vitesses plus petites sont atténuées dans la composante verticale ou contaminées par un ajout de bruit dans la composante longitudinale.

Le PC-ADP semble avoir un grand potentiel pour l'étude de l'écoulement et de la turbulence autour de dunes en rivière peu profonde. Cependant, sa faible résolution spatiale n'a pas permis une étude détaillée de ce type d'environnement à cause de la taille de ses cellules de 5 centimètres et du diamètre horizontal du volume d'échantillonnage défini par l'inclinaison des faisceaux qui est d'environ 20 cm près du lit. Les vitesses et les rapports signal-à-bruit mesurés représentent donc une moyenne spatiale sur le plan horizontal des mesures à l'intérieur du volume d'échantillonnage. De plus, puisque l'écoulement est hétérogène autour de la dune,



les valeurs des cisaillements de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente sont contaminées par l'ajout de bruit causé par le changement de coordonnées. Malgré ces difficultés, les résultats obtenus avec le PC-ADP dans l'environnement des dunes mobiles de la rivière Rouge sont typiques de l'écoulement près de dunes tels que rapportés dans la littérature. Nous avons observé une augmentation des cisaillements de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente tout juste à l'aval de la dune, résultats qui concordent avec ceux obtenus dans d'autres études (Bennett et Best, 1995; Venditti et Bennett, 2000; Venditti et Bauer, 2005). Lorsque les mesures de PC-ADP sont contaminées par le bruit causé par le changement de coordonnées, la corrélation entre les composantes longitudinale et verticale de l'écoulement et par le fait même la valeur du cisaillement de Reynolds dans le plan  $xz$  diminuent.

Plusieurs recommandations découlent de cette étude sur l'utilisation du PC-ADP en rivière peu profonde. Nous proposons le recours à l'algorithme de résolution des ambiguïtés de Lacy et Sherwood (2004) tel que nous l'avons modifié, une durée d'échantillonnage d'au moins 900 secondes (15 minutes), et des cellules de 5 à 9 *cm* pour échantillonner avec le PC-ADP dans des écoulements de 30 à 70  $\text{cm s}^{-1}$  et de 40 à 100 *cm* de profond. Le délai entre les impulsions doit être ajusté judicieusement lors des mesures de vitesse près du lit afin de limiter l'interférence entre les impulsions qui réduit la corrélation des mesures du PC-ADP.

Les tests dans les différents environnements fluviaux nous ont permis d'établir que le PC-ADP a un grand potentiel dans l'étude de la turbulence en rivière peu profonde, que ce soit à lit sablonneux ou graveleux. Il ouvre la possibilité de faire avancer les connaissances sur la dynamique des structures turbulentes à grande échelle dans les rivières peu profondes.

## BIBLIOGRAPHIE

- Babakaiff, C. S., Hickin, E. J., 1996. Coherent flow structures in Squamish River Estuary, British Columbia. Dans Ashworth, P. J., éditeur, *Coherent Flow Structures in Open Channels*, pages 321–342. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Barua, D. K., Rahman, K. H., 1998. Some aspects of turbulent flow structure in large alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 36:235–252.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1971. *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*. Wiley-Interscience.
- Bennett, S. J., Best, J. L., 1995. Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes : Implications for sediment transport and bedform stability. *Sedimentology*, 42:401–513.
- Berezutskii, A. V., Maximov, S. E., Sklyarov, V. E., 1991. Deep ADCP velocity measurements in the Gulf Stream. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8:884–887.
- Best, J., 2005. The fluid dynamics of river dunes : A review and some future research directions. *Journal of Geophysical Research*, 110:F04S02.
- Best, J. L., 1993. On the Interactions Between Turbulent Flow Structure, Sediment Transport and Bedform Development : Some Considerations From Recent Experimental Research. Dans Clifford, N. J., French, J. R., Hardisty, J., éditeurs, *Turbulence : Perspectives on Flow and Sediment Transport*, pages 61–92. John Wiley & Sons.
- Betteridge, K. F. E., Thorne, P. D., Bell, P., 2002. Assessment of acoustic coherent doppler and cross-correlation techniques for measuring near-bed velocity and suspended sediment profiles in the marine environment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:367–380.

- Betteridge, K. F. E., Williams, J. J., Thorne, P. D., Bell, P., 2003. Acoustic instrumentation for measuring near-bed sediment processes and hydrodynamics. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 285-286:105–118.
- Biron, P. M., Lane, S. N., Roy, A. G., Bradbrook, K. F., Richard, K. S., 1998. Sensitivity of bed shear stress estimated from vertical velocity profiles : The problem of sampling resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 133–139.
- Biron, P. M., Robson, C., Lapointe, M. F., Gaskin, S. J., 2004. Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29:1403–1415.
- Brumley, B. H., Cabrera, R. G., Deines, K. L., Terray, E. A., 1999. Performance of a broad-band acoustic Doppler current profiler. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 16:402–407.
- Buffin-Bélanger, T., Roy, A. G., 2005. 1 min in the life of a river : selecting the optimal record length for the measurement of turbulence in fluvial boundary layers. *Geomorphology*, 68:77–94.
- Cantwell, B. J., 1981. Organized motion in turbulent-flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13:457–515.
- Cheng, R. T., Ling, C.-H., Gartner, J. W., 1999. Estimates of bottom roughness length and bottom shear stress in south San Francisco Bay, California. *Journal of Geophysical Research*, 104:7715–7728.
- Clifford, N. J., French, J. R., 1993a. Monitoring and analysis of turbulence in geophysical boundaries : some analytical and conceptual issues. Dans Clifford, N. J., French, J. R., Hardisty, J., éditeurs, *Turbulence : Perspectives on Flow and Sediment Transport*, pages 93–120. John Wiley & Sons.
- Clifford, N. J., French, J. R., 1993b. Monitoring and modelling turbulent flows : historical and contemporary perspectives. Dans Clifford, N. J., French, J. R.,

- Hardisty, J., éditeurs, *Turbulence : Perspectives on Flow and Sediment Transport*, pages 1–34. John Wiley & Sons.
- Dargahi, B., 2004. Three-dimensional flow modelling and sediment transport in the river Klaralven. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29:821–852.
- Dinehart, R. L., Bureau, J. R., 2005. Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossing of bend. *Water Resources Research*, 41(W09405):2005WR004050.
- Falco, R. E., 1977. Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers. *The Physics of Fluids*, 20:S124–S132.
- Fischer, J., Schott, F. A., Dengler, M., 2004. Boundary circulation at the exit of the Labrador Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 34:1548–1570.
- Gargett, A. E., 1994. Observing turbulence with a modified acoustic Doppler current profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11:1592–1610.
- Gartner, J. W., 2004. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211:169–187.
- Gartner, J. W., Ganju, N. K., 2002. A preliminary evaluation of near-transducer velocities collected with low-blank acoustic Doppler current profiler. Dans *ASCE, Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference, Estes Park, CO*.
- Gonzalez-Castro, J., Oberg, K., Duncker, J. J., 2000. Effect of temporal resolution on the accuracy of ADCP measurements. Dans *Proceedings ASCE Conference, Minneapolis, MN (CD-ROM)*.
- Gordon, R. L., 1989. Acoustic measurement of river discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(7):925–936.
- Gordon, R. L. Acoustic Doppler current profiler principles of operation : A practical primer, 1996.

- Goring, D. G., Nikora, V. I., 2002. Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1):117–126.
- Grass, A. J., 1971. Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, 50:233–255.
- Hall, M., Joyce, T. M., Pickart, R. S., Torres, W. M. S. D. J., 2004. Zonal circulation across 52° W in the North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 109.
- Hinze, J. O., 1975. *Turbulence*. McGraw-Hill.
- Jackson, R. G., 1976. Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulence bursting phenomenon in geophysical flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 77:531–560.
- Kawanisi, K., 2004. Structure of turbulent flow in a shallow tidal estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(4):360–370.
- Kironoto, B. A., Graf, W. H., 1995. Turbulence characteristics in rough non-uniform open-channel flow. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, 112(4):336–348.
- Kostachuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., Franklin, M., 2005. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68(1-2):25–37.
- Kostachuk, R., Villard, P., Best, J., 2004. Measuring velocity and shear stress over dunes with acoustic Doppler profiler. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9):932–936.
- Kostaschuk, R., Church, M., 1993. Macroturbulence generated by dunes : Fraser River, Canada. *Sedimentary Geology*, 85:25–37.
- Lacy, J. R., Sherwood, C. R., 2004. Accuracy of a pulse-coherent acoustic Doppler profiler in a wave-dominated flow. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:1448–1461.

- Lane, S. N., Biron, P. M., Bradbrook, K. F., Butler, J. B., Chandler, J. H., Crowell, M. D., McLelland, S. J., Richards, K. S., Roy, A. G., 1998. Three-dimensional measurement of river channel flow processes using acoustic Doppler velocimetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23:1247–1267.
- Lhermitte, R., Serafin, R., 1984. Pulse-to-pulse coherent Doppler sonar signal processing techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1:293–308.
- Lohrmann, A., Hackett, B., Roed, L. P., 1990. High resolution measurements of turbulence, velocity and stress using a pulse-to-pulse coherent sonar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7:19–37.
- Lu, S. S., Willmarth, W. W., 1973. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 60:481–511.
- Lu, Y., Lueck, R. G., 1999a. Using a Broadband ADCP in a tidal channel. Part I : Mean flow and shear. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16: 1556–1567.
- Lu, Y., Lueck, R. G., 1999b. Using a broadband ADCP in a tidal channel. Part II : Turbulence. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16:1568–1579.
- Lu, Y., Lueck, R. G., Huang, D., 2000. Turbulence characteristics in a tidal channel. *Journal of Physical Oceanography*, 30:855–867.
- MacVicar, B., 2006. *On Turbulence and the Formation of Riffle-Pools in Gravel-Bed Rivers*. Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- Miller, K. S., Rochwarger, M. M., 1972. A covariance approach to spectral moment estimation. *IEEE Transaction on Information Theory*, IT-18:588–596.
- Muste, M., Yu, K., Pratt, T., Abraham, D., 2004a. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II : fixed-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15:17–28.

- Muste, M., Yu, K., Spasojevic, M., 2004b. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I : moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15:1–16.
- Nelson, J. M., McLean, S. R., Wolfe, S. R., 1993. Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bedforms. *Water Resources Research*, 29:3935–3953.
- Nezu, I., Nakagawa, H., 1993. *Turbulence in Open-Channel Flows*. IAHR Monograph Series. Balkema.
- Nicholas, A. P., 2001. Computational fluid dynamics modelling of boundary roughness in gravel-bed rivers : an investigation of the effects of random variability in bed elevation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(4):345–362.
- Nikora, V. I., Goring, D. G., 2000. Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9):679–690.
- Nikora, V., 2005. Hydrodynamic effects in gravel-bed rivers : from micro- to macro-turbulence. Dans Mosley, M. P., éditeur, *Gravel-Bed Rivers VI*, pages 1–42. New Zealand Hydrological Society.
- Nystrom, E. A., 2001. Applicability of acoustic Doppler profilers to measurement of mean velocity and turbulence parameters. Mémoire de maîtrise, University of Illinois.
- Nystrom, E. A., Oberg, K. A., Rehmann, C. R., 2002. Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers : Sources of error and laboratory results. Dans ASCE, *Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference, Estes Park, CO*.
- Rennie, C. D., Millar, R. G., Church, M. A., 2002. Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128: 473–483.

- Richardson, W. R., Thorne, C. R., 1998. Secondary currents around braid bar in Brahmaputra River, Bangladesh. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124:325–328.
- Rippeth, T. P., Williams, E., Simpson, J. H., 2002. Reynolds stress and turbulent energy production in a tidal channel. *Journal of Physical Oceanography*, 32: 1242–1251.
- Roy, A. G., Buffin-Bélanger, T., 2001. Advances in the study of turbulent flow structures in gravel-bed rivers. Dans Mosley, M. P., éditeur, *Gravel-Bed Rivers V*, pages 375–404. New Zealand Hydrological Society.
- Shields, F. D., Knigh, J. S. S., Testa, S., Cooper, C. M., 2003. Use of acoustic Doppler current profiler to describe velocity distributions at reach scale. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(6):1397–1408.
- Shields, F. D., Rigby, J. R., 2005. River habitat quality from river velocities measured using Acoustic Doppler Current Profiler. *Environmental Management*, 36 (4):565–575.
- Simpson, J. H., Fischer, N. R., Wiles, P., 2004. Reynolds stress and TKE production in a estuary with tidal bore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60:619–627.
- SonTek, 2001. *SonTek ADVField acoustic Doppler velocimeter technical documentation*, 2001.
- SonTek, 2004. *Introduction and reference guide for the SonTek/YSI pulse-coherent acoustic Doppler profiler*, 2004.
- Soulsby, R. L., 1980. Selecting record length and digitization rate for near-bed turbulence measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 10:208–219.
- Souza, A. J., Howarth, M. J., 2005. Estimates of Reynolds stress in a highly energetic shelf sea. *Ocean Dynamics*, 55:490–498.



- Stacey, M. T., Monismith, S. G., Burau, J. R., 1999a. Measurements of Reynolds stress profiles in unstratified tidal flow. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C5):10933–10949.
- Stacey, M. T., Monismith, S. G., Burau, J. R., 1999b. Observations of turbulence in a partially stratified estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 29:1950–1970.
- Tilston, M., 2006. Three-dimensional flow structure, turbulence and bank erosion in a 180° meander loop. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal.
- Tilston, M., Biron, P., sous presse. Structure de l'écoulement tri-dimensionnel, turbulence et contrainte de cisaillement dans une boucle de méandre. *Géographie physique et Quaternaire*.
- Torrence, C., Compo, G. P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:61–78.
- Tritton, D. J., 1988. *Physical Fluid Dynamics*. Oxford University Press, 2 édition.
- Venditti, J. G., Bauer, B. O., 2005. Turbulent flow over a dune : Green river, Colorado. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30:289–304.
- Venditti, J. G., Bennett, S. J., 2000. Spectral analysis of turbulent flow and suspended sediment transport over fixed dunes. *Journal of Geophysical Research*, 105:22035–22047.
- Visbeck, M., Fischer, J., 1995. Sea surface conditions remotely sensed by upward-looking ADCP. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12:141–149.
- Voulgaris, G., Trowbridge, J. H., 1998. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15:272–289.
- Wewetzer, S. F. K., Duck, R. W., Anderson, J. M., 1999. Acoustic Doppler current profiler measurements in coastal and estuarine environments : examples from the Tay Estuary, Scotland. *Geomorphology*, 29:21–30.

- Wilkinson, R. H., 1984. A method for evaluating statistical errors associated with logarithmic velocity profiles. *Geo-Marine Letters*, 3:49–52.
- Yorke, T. H., Oberg, K. A., 2002. Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13:191–195.
- Zedel, L., Hay, A. E., Cabrera, R., Lohrmann, A., 1996. Performance of a single-beam pulse-to-pulse coherent Doppler profiler. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(3):290–297.

## Annexe I

### Matrice de changement de coordonnées

La matrice de conversion pour un ADP à trois faisceau disposés à un angle de  $\theta$  par rapport à la verticale et séparés par un angle de  $2\phi$  :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = T(\theta, \phi) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

où

$$T(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1+\cos\phi)\sin\theta} & -\frac{1}{2(1+\cos\phi)\sin\theta} & -\frac{1}{2(1+\cos\phi)\sin\theta} \\ 0 & \frac{1}{2\sin\phi\sin\theta} & -\frac{1}{2\sin\phi\sin\theta} \\ -\frac{\cos\phi}{(1+\cos\phi)\cos\theta} & -\frac{1}{2(1+\cos\phi)\cos\theta} & -\frac{1}{2(1+\cos\phi)\cos\theta} \end{bmatrix}$$

Pour la transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = T^{-1}(\theta, \phi) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

avec

$$T^{-1}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \sin\theta & 0 & -\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta & \sin\phi\sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta & -\sin\phi\sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix}$$

Pour le PC-ADP de Sontek,  $\theta = 15^\circ$  et  $\phi = 60^\circ$ .

## Annexe II

### Calcul du bruit dans les mesures d'ADP

Le bruit dans les mesures de vitesses d'ADP est estimé à partir des équations développées par Nystrom (2001). Nous définissons  $v_i$ , la vitesse radiale mesurée par le faisceau  $i$  et  $V_i$ , la vitesse radiale correspondant à la vitesse réelle de l'écoulement. Le bruit comprend un biais,  $b_i$ , qui varie en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement, du cisaillement, de la turbulence, de la taille de la cellule, un bruit aléatoire (Doppler ou autre),  $n_i$ , et une composante qui représente l'estompage relié à l'effet du volume d'échantillonnage,  $d_i$ . Ainsi,

$$v_i = V_i + b_i + n_i + d_i \quad (\text{II.1})$$

et les fluctuations de vitesse sont données par :

$$v_i' = V_i' + n_i + d_i. \quad (\text{II.2})$$

puisque  $b_i$  est considéré constant dans le temps. Si  $v_i$  et  $d_i$  ne sont pas corrélés avec le bruit aléatoire, la variance de la vitesse radiale du faisceau  $i$ ,  $\overline{v_i'^2}$ , est alors

$$\overline{v_i'^2} = \overline{V_i'^2} + \overline{n_i^2} + \overline{d_i^2} + 2\overline{V_i' d_i}. \quad (\text{II.3})$$

La variance de l'erreur,  $\sigma_n^2$  se définit comme

$$\sigma_n^2 = \overline{v_i'^2} - \overline{V_i'^2} = \overline{n_i^2} + \overline{d_i^2} + 2\overline{V_i' d_i}. \quad (\text{II.4})$$

où  $\sigma_n^2$  peut être positif ou négatif signifiant ainsi une hausse ou une baisse de la

variance mesurée par rapport à la variance de la vitesse réelle de l'écoulement,  $V_i$ .

Pour un ADP à trois faisceaux,

$$u = \frac{2v_1 - v_2 - v_3}{2(1 + \cos \alpha) \sin \theta} \quad (\text{II.5})$$

$$v = \frac{v_2 - v_3}{2 \sin \alpha \sin \theta} \quad (\text{II.6})$$

$$w = \frac{-2v_1 \cos \alpha + v_2 + v_3}{2(1 + \cos \alpha) \cos \theta} \quad (\text{II.7})$$

en utilisant  $v_i = V_i + b_i + n_i + d_i$ , on obtient :

$$u = \frac{2(V_1 + b_1 + n_1 + d_1) - (V_2 + b_2 + n_2 + d_2) - (V_3 + b_3 + n_3 + d_3)}{2(1 + \cos \alpha) \sin \theta} \quad (\text{II.8})$$

$$v = \frac{(V_2 + b_2 + n_2 + d_2) - (V_3 + b_3 + n_3 + d_3)}{2 \sin \alpha \sin \theta} \quad (\text{II.9})$$

et

$$w = \frac{-2 \cos \alpha (V_1 + b_1 + n_1 + d_1) + (V_2 + b_2 + n_2 + d_2) + (V_3 + b_3 + n_3 + d_3)}{2(1 + \cos \alpha) \cos \theta}. \quad (\text{II.10})$$

Les fluctuations de vitesses sont :

$$u' = \frac{2(V'_1 + n_1 + d_1) - (V'_2 + n_2 + d_2) - (V'_3 + n_3 + d_3)}{2(1 + \cos \alpha) \sin \theta} \quad (\text{II.11})$$

$$v' = \frac{(V'_2 + n_2 + d_2) - (V'_3 + n_3 + d_3)}{2 \sin \alpha \sin \theta} \quad (\text{II.12})$$

$$w' = \frac{-2\cos\alpha(V'_1 + n_1 + d_1) + (V'_2 + n_2 + d_2) + (V'_3 + n_3 + d_3)}{2(1 + \cos\alpha)\cos\theta} \quad (\text{II.13})$$

On peut calculer les variances en assumant que  $\overline{n^2} = \overline{n_1^2} = \overline{n_2^2} = \overline{n_3^2}$  et  $\overline{d^2} = \overline{d_1^2} = \overline{d_2^2} = \overline{d_3^2}$  et que  $\overline{V'd} = \overline{V'_1 d_1} = \overline{V'_2 d_2} = \overline{V'_3 d_3}$ .

$$\overline{u'^2} = \frac{4\overline{V_1'^2} + \overline{V_2'^2} + \overline{V_3'^2} + 6\overline{n^2} + 6\overline{d^2} + 12\overline{V'd} - 4\overline{V'_1 V'_2} - 4\overline{V'_1 V'_3} + 2\overline{V'_2 V'_3}}{4(1 + \cos\alpha)^2 \sin^2\theta} \quad (\text{II.14})$$

$$\overline{v'^2} = \frac{\overline{V_2'^2} + \overline{V_3'^2} + 2\overline{V'_2 V'_3} + 2\overline{n^2} + 2\overline{d^2} + 4\overline{V'd}}{4\sin^2\alpha \sin^2\theta} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{aligned} \overline{w'^2} = & \frac{4\cos^2\alpha \overline{V_1'^2} + \overline{V_2'^2} + \overline{V_3'^2} + 2(1 + 2\cos^2\alpha)(\overline{n^2} + 6\overline{d^2} + 2\overline{V'd})}{4(1 + \cos\alpha)^2 \cos^2\theta} - \\ & \frac{4\cos\alpha(\overline{V'_1 V'_2} + \overline{V'_1 V'_3}) + 2\overline{V'_2 V'_3}}{4(1 + \cos\alpha)^2 \cos^2\theta} \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

Puisque les variances des vitesses réelles sont données par :

$$\overline{U'^2} = \frac{4\overline{V_1'^2} + \overline{V_2'^2} + \overline{V_3'^2} - 4\overline{V'_1 V'_2} - 4\overline{V'_1 V'_3} + 2\overline{V'_2 V'_3}}{4(1 + \cos\alpha)^2 \sin^2\theta} \quad (\text{II.17})$$

$$\overline{V'^2} = \frac{\overline{V_2'^2} + \overline{V_3'^2} + 2\overline{V'_2 V'_3}}{4\sin^2\alpha \sin^2\theta} \quad (\text{II.18})$$

$$\overline{W'^2} = \frac{4 \cos^2 \alpha \overline{V_1'^2} + \overline{V_2'^2} + \overline{V_3'^2} - 4 \cos \alpha (\overline{V_1' V_2'} + \overline{V_1' V_3'}) + 2 \overline{V_2' V_3'}}{4(1 + \cos \alpha)^2 \cos^2 \theta} \quad (\text{II.19})$$

la variance de l'erreur associé au bruit Doppler dans les coordonnées cartésiennes est donc

$$\sigma_{un}^2 = \overline{u'^2} - \overline{U'^2} = \frac{3}{2} \frac{(\overline{n^2} + \overline{d^2} + 2\overline{V'd})}{(1 + \cos \alpha)^2 \sin^2 \theta}, \quad (\text{II.20})$$

$$\sigma_{vn}^2 = \overline{v'^2} - \overline{V'^2} = \frac{(\overline{n^2} + \overline{d^2} + 2\overline{V'd})}{2 \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}, \quad (\text{II.21})$$

et

$$\sigma_{wn}^2 = \overline{w'^2} - \overline{W'^2} = \frac{(1 + 2 \cos^2 \alpha)(\overline{n^2} + \overline{d^2} + 2\overline{V'd})}{2(1 + \cos \alpha)^2 \cos^2 \theta}. \quad (\text{II.22})$$

Si on les exprime en terme de  $\sigma_n^2$ , le bruit dans les mesures de vitesses radiales :

$$\sigma_{un}^2 = \frac{3}{2} \frac{\sigma_n^2}{(1 + \cos \alpha)^2 \sin^2 \theta}, \quad (\text{II.23})$$

$$\sigma_{vn}^2 = \frac{\sigma_n^2}{2 \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}, \quad (\text{II.24})$$

$$\sigma_{wn}^2 = \frac{(1 + 2 \cos^2 \alpha) \sigma_n^2}{2(1 + \cos \alpha)^2 \cos^2 \theta}. \quad (\text{II.25})$$

avec  $\theta = 15^\circ$  et  $\alpha = 60^\circ$ ,

$$\sigma_{un}^2 = 9.95 \sigma_n^2 \quad (\text{II.26})$$

$$\sigma_{vn}^2 = 9.95 \sigma_n^2 \quad (\text{II.27})$$

$$\sigma_{wn}^2 = 0.357 \sigma_n^2 \quad (\text{II.28})$$

Si les fluctuations de vitesses, le bruit Doppler, le *damping* et l'effet du changement de coordonnées à partir de vitesses mesurées à des endroits différents ne sont pas corrélés entre eux, la variance de chaque composante peut être écrite comme :

$$\sigma_u^2 = \sigma_U^2 + \sigma_{un}^2 + \sigma_{uc}^2 \quad (\text{II.29})$$

$$\sigma_v^2 = \sigma_V^2 + \sigma_{vn}^2 + \sigma_{vc}^2 \quad (\text{II.30})$$

$$\sigma_w^2 = \sigma_W^2 + \sigma_{wn}^2 + \sigma_{wc}^2 \quad (\text{II.31})$$

où  $\sigma_{uc}^2$  est la variance introduite par le changement de coordonnées et  $\sigma_U^2$  la variance réelle de l'écoulement.



